DESARROLLO DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICIÓN DE PRODUCTOS DE FIQUE PARA EL EMPLEO DE ESTRUCTURAS EN AMBIENTE AGRESIVO

JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
DOCTORADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2020

DESARROLLO DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICIÓN DE PRODUCTOS DE FIQUE PARA EL EMPLEO DE ESTRUCTURAS EN AMBIENTE AGRESIVO

JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ

Tesis doctoral presentada para optar al título de
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES

Director: Prof. Ricardo Alfredo Cruz Hernández, PhD
Codirector: Prof. Luis Eduardo Zapata Orduz, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
DOCTORADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2020

DEDICATORIA

A mi esposa Dayana por su amor y apoyo permanente en nuestros ocho años de matrimonio.

A mi hijo, Julián Jerónimo, porque con solo cinco años, supo brindarme todo su amor, esperar el momento para jugar, y comprender la falta de tiempo para estar con él.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida y fortaleza para enfrentar cada reto de mi vida.

A mi papás, Orlando y Myriam, por darme la vida y a mis abuelos Pedro (QEPD) y Lilia por haber sido como mis padres.

A los profesores Luz Amparo Quintero y Ricardo Cruz de la UIS por su apoyo, colaboración, confianza, amistad y formación en mis estudios de maestría y doctorado.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS por abrirme sus puertas para cursar mi pregrado como Ingeniero Metalúrgico y mis estudios de posgrado como Magister y Doctor en Ingeniería de Materiales, llegando a ser el primer Ingeniero Metalúrgico que completa todo el ciclo de formación que ofrece la Escuela.

A la Universidad de los Andes, especialmente al profesor Jorge Medina, por su apoyo y colaboración durante mi pasantía doctoral.

A José Delio Porras de Ecofibras y Augusto Tavera de María Canela por su colaboración para la consecución de la fibra y el jugo de fique de la investigación.

A mi prima Paola Sánchez por su ayuda en el cortado de la fibra de fique. También a William Rios y Javier Mora por su colaboración y amistad.

A los técnicos de los laboratorios de la UIS, Jairo “mechuda”, Jaime, Ambrosio, Mario, Oscar, Domingo y Sergio; por su amistad y apoyo para la realización de todas las pruebas de la investigación.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN 15

1. CARACTERÍSTICAS DEL JUGO Y LA FIBRA DE FIQUE CON Y SIN TRATAMIENTO SUPERFICIAL 19

1.1 INTRODUCCIÓN 19

1.2 METODOLOGÍA 22

1.2.1 Caracterización físico-química del jugo de fique 22

1.2.2 Caracterización física, química y mecánica de la fibra de fique 25

1.2.3 Tratamiento superficial de la fibra de fique 31

1.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS 33

1.3.1 Caracterización físico – química del jugo de fique 33

1.3.2 Caracterización química y física de la fibra de fique 38

1.3.3 Caracterización mecánica de la fibra de fique 53

1.3.4 Tratamiento superficial de la fibra de fique 59

1.4 CONCLUSIONES 77

2. COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN CONCRETO MODIFICADO CON FIBRA Y JUGO DE FIQUE 80

2.1 INTRODUCCIÓN 80

2.2 METODOLOGÍA 83

2.2.1 Fabricación de concreto 83

2.2.2 Caracterización de concreto en estado fresco 87

2.2.3 Caracterización de concreto en estado endurecido 87

2.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS 95

2.3.1 Propiedades fisico-mecánicas de concreto con fibra de fique 95

2.3.2 Propiedades físico-mecánicas de concreto con jugo de fique 130

2.3.3 Propiedades físico-mecánicas de concreto con jugo y fibra de fique sin y con tratamiento 148

2.4 CONCLUSIONES 171

3. DURABILIDAD DE UN CONCRETO ADICIONADO CON JUGO Y FIBRA DE FIQUE TRATADA 175
3.1 INTRODUCCIÓN 175
3.2 METODOLOGÍA 176
3.2.1 Ensayo de conductancia eléctrica 176
3.2.2 Ensayo de carbonatación acelerada 178
3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS 181
3.3.1 Conductancia eléctrica 181
3.3.2 Carbonatación acelerada 184
3.4 CONCLUSIONES 200
4. CONCLUSIONES GENERALES 204
5. RECOMENDACIONES 208
BIBLIOGRAFÍA 209
ANEXOS 229

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Composición química jugo de fique 38
Tabla 2. Composición química de la fibra de fique 41
Tabla 3. Porcentajes de elementos hallados en las fibras mediante EDS 44
Tabla 4. Propiedades de la fibra de fique 61
Tabla 5. Comparación de propiedades de la fibra con y sin tratamiento 72
Tabla 6. Convención de concreto con fibra de fique 96
Tabla 7. Convención de concreto con jugo de fique 130
Tabla 8. Formulación química y abreviaturas de compuestos base cemento 145
Tabla 9. Convención de concreto con fibra y jugo de fique 149
Tabla 10. Resultados EDS de los residuos de pasta de cemento sobre la superficie de la fibra 171
Tabla 11. Condiciones de operación de la cámara de carbonatación 180
Tabla 12. Convención de los concretos sometidos a carbonatación 185
Tabla 13. Resultados de avance de la carbonatación en el tiempo 0 horas y después de 144 horas 187
Tabla 14. Modelo de ajuste y coeficiente de carbonatación para la penetración en función del tiempo de exposición 193
Tabla 15. Modelos de ajuste para la relación resistencia a la compresión y penetración radial 195

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del jugo de fique 23
Figura 2. Ensayo de formación de espuma 24
Figura 3. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del jugo de fique 26
Figura 4. Montaje de muestras de fibra para observación en MOP y MEB 28
Figura 5. Probetas para ensayo de tracción 30
Figura 6. Toma del diámetro de la fibra de fique 30
Figura 7. Estimación del área de la sección transversal de la fibra de fique 31
Figura 8. Diagrama del proceso metodológico para el tratamiento superficial de la fibra 31
Figura 9. Montaje para el tratamiento superficial de la fibra 33
Figura 10. Comportamiento del pH en el tiempo 34
Figura 11. Estados de fermentación del jugo de fique 36
Figura 12. Formación de espuma del jugo de fique 24 horas después de extracción 37
Figura 13. Cambio en el poder espumante del jugo de fique durante 30 días 37
Figura 14. Gráfica del modelo lineal ajustado de masa vs longitud 41
Figura 15. Microscopía óptica del aspecto longitudinal de la fibra de fique 45
Figura 16. MEB del aspecto longitudinal de la fibra de fique 47
Figura 17. Microscopía óptica del aspecto transversal de la fibra de fique 49
Figura 18. MEB del aspecto transversal de la fibra de fique 52
Figura 19. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria de fibra de fique 60
Figura 20. pH obtenido para la fibra de fique sin y con tratamiento 62
Figura 21. Espectro FTIR para la fibra de fique sin tratamiento 63
Figura 22. Comparación de espectros FTIR de la fibra tratada y sin tratamiento 67
Figura 23. Microscopia óptica de fibra sin y con tratamiento en NaOH 68
Figura 24. Microfotografías en MEB de la fibra de fique tratada con NaOH por 5 y 10 minutos 71
Figura 25. Resistencia a la tracción de la fibra sin y con tratamiento 72
Figura 26. Módulo de elasticidad de la fibra sin y con tratamiento 74
Figura 27. Comparación de la curva esfuerzo vs deformación para fibra sin y con tratamiento alcalino 75
Figura 28. Absorción de agua de la fibra sin y con tratamiento 76
Figura 29. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del concreto 84
Figura 30. Montaje ensayo resistencia a la flexión 90
Figura 31. Procedimiento de preparación de muestras para análisis digital 94
Figura 32. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra de fique 97
Figura 33. Concreto con fibra de fique en estado fresco 99
Figura 34. Densidad en estado fresco de concreto con fibra de fique 100

Figura 35. Diagrama de pareto estandarizado de resistencia a la compresión de concreto con fibra 102
Figura 36. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con fibra 102
Figura 37. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra de fique 104
Figura 38. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra de fique 105
Figura 39. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la flexión de concreto con fibra de fique 107
Figura 40. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con fibra de fique 108
Figura 41. Fractura de concreto reforzado sin y con fibra de fique 111
Figura 42. Superficie fracturada por rotura a flexo-tracción 113
Figura 43. Comparación a flexo-tracción de concreto sin y con refuerzo de fique 116
Figura 44. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto sin y con fibra de fique 119
Figura 45. MEB de concreto con fibra de fique 122
Figura 46. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para Dsg de concreto con fibra de fique 124
Figura 47. Diagrama de Pareto Estandarizado para la porosidad interconectada de concreto con fibra de fique 126
Figura 48. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la porosidad interconectada de concreto con fibra de fique 127
Figura 49. Muestras preparadas con tinta y ZnO para análisis de porosidad total de concreto con fibra de fique 128
Figura 50. Diagrama de Pareto Estandarizado para el porcentaje de área de poros de concreto con fibra de fique 129
Figura 51. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con jugo de fique y aditivo comercial 131
Figura 52. Diagrama de columnas para densidad de concreto con jugo de fique y aditivo comercial en estado fresco 133
Figura 53. Diagrama de columnas para pH de concreto con jugo de fique y aditivo comercial en estado fresco 134
Figura 54. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con jugo de fique 135
Figura 55. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con jugo de fique 136
Figura 56. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con jugo de fique 137
Figura 57. Comparación a flexo-tracción de concreto sin y con jugo de fique 137
Figura 58. Energía absorbida a flexo-tracción de concreto sin y con aditivo 138

Figura 59. MEB de la porosidad en concreto sin y con jugo de fique 139
Figura 60. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para porosidad interconectada de concreto con jugo de fique 140
Figura 61. Muestras preparadas con tinta y ZnO para análisis de porosidad de concreto con jugo de fique 141
Figura 62. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para el porcentaje de área de poros de concreto con jugo de fique 142
Figura 63. Comparación entre asentamiento y porosidad total de concreto en estado endurecido 143
Figura 64. Diagrama de columnas de Dsg para concreto con aditivo 144
Figura 65. DRX de concreto sin y con jugo de fique al 2% 146
Figura 66. MEB de fases en concreto 147
Figura 67. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra y jugo de fique 150
Figura 68. Densidad en estado fresco de concreto con fibra y jugo de fique 150
Figura 69. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la compresión de concreto con fibra y jugo de fique 151
Figura 70. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con fibra y jugo de fique 151
Figura 71. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra y jugo de fique 152
Figura 72. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra y jugo de fique 153
Figura 73. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la flexión de concreto con fibra y jugo de fique 154
Figura 74. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con fibra y jugo de fique 154
Figura 75. Comparación a flexo-tracción de CS, CF75 y CF75J1 156
Figura 76. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto con fibra y jugo de fique 157
Figura 77. MEB de concreto con fibra y jugo de fique 158
Figura 78. Diagrama de columnas de Dsg para concreto con fibra y jugo de fique 158
Figura 79. Diagrama de Pareto Estandarizado para la porosidad interconectada de concreto con fibra y jugo de fique 159
Figura 80. Diagrama de columnas para el porcentaje de área de poros de concreto con fibra y jugo de fique 159
Figura 81. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra tratada y jugo de fique 160
Figura 82. Diagrama de columnas para resistencia a la compresión de concreto con fibra tratada y jugo de fique 161
Figura 83. Diagrama de columnas para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra tratada y jugo de fique 162

Figura 84. Diagrama de columnas para el módulo de rotura a flexión de concreto con fibra tratada y jugo de fique 163
Figura 85. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto con fibra tratada y jugo de fique 163
Figura 86. Comparación a flexo-tracción de CS, CF5, CF5J1, CFT y CJFT 164
Figura 87. Diagrama de columnas para Dsg de concreto con fibra tratada y jugo de fique 166
Figura 88. Diagrama de columnas para porosidad interconectada de concreto con fibra tratada y jugo de fique 166
Figura 89. MEB de fibra sin y con tratamiento superficial extraída del concreto 169
Figura 90. MEB y EDS a fibra de fique con residuos de pasta de cemento 170
Figura 91. Equipo Perma 2 y montaje para el ensayo de conductancia eléctrica 178
Figura 92. Cámara de carbonatación acelerada 179
Figura 93. Equipos de monitoreo y medición de CO_2 179
Figura 94. Diagrama de Pareto Estandarizado para la conductancia eléctrica de concreto con fibra de fique 182
Figura 95. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con fibra de fique 182
Figura 96. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con jugo de fique 184
Figura 97. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con fibra y jugo de fique 185
Figura 98. Probetas carbonatadas con aplicación de fenolftaleína al 1,0% 186
Figura 99. Comportamiento de la penetración radial con el tiempo de exposición al CO_2 188
Figura 100. Diagramas de Pareto Estandarizado de resistencia a la compresión para concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2 189
Figura 101. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la resistencia a la compresión de concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2 190
Figura 102. Comportamiento a compresión de concreto sometido a carbonatación acelerada 190
Figura 103. Diagramas de Pareto Estandarizado de penetración radial para concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2 191
Figura 104. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para penetración radial de concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2 192
Figura 105. Comportamiento de la resistencia a la compresión vs penetración radial 194
Figura 106. Comparación de difractogramas de CS sin y con exposición a CO_2 199
Figura 107. Comparación de difractogramas de CJ1 sin y con exposición a CO_2 199

LISTA DE ANEXOS

pág.

ANEXO A. Dosificaciones de concreto 229
ANEXO B. Matrices experimentales 230
ANEXO C. Cambio porcentual de las propiedades mecánicas 232

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICIÓN DE PRODUCTOS DE FIQUE PARA EL EMPLEO DE ESTRUCTURAS EN AMBIENTE AGRESIVO*

AUTOR: JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ**

PALABRAS CLAVE: Concreto fibro-reforzado, fibra de fique, jugo de fique, carbonatación.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente, las fibras naturales son un recurso objeto de múltiples investigaciones enfocadas hacia la industria de los materiales compuestos. En esta investigación se usó fibra y jugo de fique de la variedad *Furcraea Cabuya Trel* provenientes de Curití-Santander (Colombia) y se estudió la influencia de estas adiciones sobre las propiedades de un concreto con relación agua-material cementante (a/c=0,5). La fibra de fique tiene adecuada resistencia mecánica, presencia de cera, grasas y componentes lignocelulósicos en su superficie; por su parte, el jugo de fique es un subproducto de la extracción de fibra de la planta y de carácter ácido con alto poder espumante. La caracterización de la fibra y el jugo de fique fue resultado del proceso de investigación, que tuvo como objetivo el desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para su uso en estructuras en ambiente agresivo. De acuerdo con la revisión bibliográfica, este estudio es el primero que combina la fibra y el jugo de fique como adiciones en el concreto.

Para el desarrollo de esta investigación fueron fabricadas 21 mezclas de concreto y evaluadas en estado fresco y endurecido mediante distintos ensayos mecánicos, físicos y químicos; los concretos con los resultados más promisorios fueron sometidos a penetración de dióxido de carbono en una cámara de carbonatación acelerada. Debido a la naturaleza hidrofílica de la fibra de fique fue necesario tratarla con hidróxido de sodio a fin de modificar su condición superficial. A pesar de la esencia disímil de los elementos en estudio, los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que la adición de fibra produjo reducción de la resistencia a la compresión y un aumento hasta del 34% en el módulo de rotura a flexión, asimismo, el jugo de fique, como aditivo, disminuyó la porosidad interconectada y la penetración de dióxido de carbono.

---

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Ricardo Cruz Hernández. Codirector: Luis Eduardo Zapata.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF CONVENTIONAL CONCRETE WITH THE ADDITION OF FIQUE PRODUCTS FOR THE USE OF STRUCTURES IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT*

AUTHOR: JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTIZ**

KEYWORDS: Fibre-reinforced concrete, fique fibre, fique juice, carbonation

DESCRIPTION:

Currently, natural fibres are a resource that is the subject of multiple investigations focused on the composite materials industry. In this research, fibre and fique juice of the *Furcraea Cabuya Trel* variety from Curití-Santander (Colombia) were used and the influence of these additions on the properties of concrete with a water-cementing material ratio (a/c=0,5). The fique fibre has adequate mechanical resistance, presence of wax, fats and lignocellulosic components on its surface; For its part, fique juice is a by-product of the extraction of fibre from the plant and is acidic nature with high foaming power. The characterization of the fibre and the fique juice was the result of the research process, which aimed to develop a conventional concrete with the addition of fique products for use in structures in an aggressive environment. According to the literature review, this study is the first to combine fibre and fique juice as additions in concrete.

For the development of this research, twenty-one concrete mixtures were manufactured and evaluated in a fresh and hardened state through different mechanical, physical and chemical tests; the concretes with the most promising results were subjected to the penetration of carbon dioxide in an accelerated carbonation chamber. Due to the hydrophilic nature of the fique fibre, it was necessary to treat it with sodium hydroxide to modify its surface condition. Despite the dissimilar essence of the elements under study, the results obtained in this research showed that the addition of fibre produced a reduction in compressive strength and an increase of up to 34% in the modulus of rupture in flexion, likewise, the Fique juice, as an additive, decreased the interconnected porosity and the penetration of carbon dioxide.

---

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Ricardo Cruz Hernández. Codirector: Luis Eduardo Zapata.

INTRODUCCIÓN

El objetivo general del presente trabajo de doctorado en Ingeniería de Materiales se orientó al desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el uso en estructuras sometidas a ambiente agresivo. El fique es una planta originaria de Colombia, cuyo cultivo se destaca por ser estable y resistir a los diferentes fenómenos atmosféricos, es un recurso renovable, biodegradable y su producción demanda poca energía; es una planta compuesta por fibra, jugo y bagazo, en donde el primero de estos es ampliamente utilizado en la fabricación de hilados, cuerdas, artesanías y empaques, entre otros. La fibra se caracteriza por su resistencia mecánica, al igual que al calor y la humedad, aun cuando logra descomponerse en ambientes alcalinos o frente agresiones biológicas; por su parte, el jugo presenta características variables de acuerdo a la edad de la planta o a las particularidades del suelo y del ambiente.

En el país, anualmente se producen miles de toneladas de fique, sin embargo, sólo un aproximado del 4% es fibra y el restante es bagazo y jugo, un 96% porcentaje que termina desaprovechándose y desatando un problema ambiental, aumento de la demanda química de oxígeno (DQO), contaminación de fuentes hídricas cercanas al cultivo, entre otros. De allí, que la finalidad de emplear el jugo de fique como aditivo del concreto reposa en la necesidad de dar utilidad a un elemento que se está perdiendo y contribuir con la mitigación de un problema ambiental; además, que hasta el momento no existen registros bibliográficos que den cuenta de trabajos que empleen al mismo tiempo la fibra y el jugo de fique como adiciones del concreto.

Entre los propósitos de la presente investigación, está contribuir con el desarrollo de materiales compuestos base cemento reforzado con fibra natural. Este estudio es el primer paso para llenar un vacío en el conocimiento que combina el concreto, la fibra y el jugo de fique, el cual requiere mayor investigación antes de su

implementación, a pesar de las diversas pruebas y resultados obtenidos en este trabajo de doctorado.

Esta disertación doctoral buscó comprobar dos hipótesis. La primera, dirigida a verificar que la adición de fibra de fique produciría un concreto convencional con mejorada resistencia a la tracción y flexión por causa de su efecto como material de refuerzo. La segunda, orientada a demostrar que el uso como aditivo natural del jugo de fique mejoraría el comportamiento del concreto ante el ataque por agente agresivo tipo carbonato, debido a su característica como aditivo inclusor de aire.

Esta tesis se organiza en tres capítulos, desde los cuales se abordan los seis objetivos específicos que fueron planteados. Cada apartado presenta una introducción en la que se explicitan y amplían los objetivos establecidos, se realiza la explicación de la metodología empleada y del marco teórico conceptual que fundamenta la investigación, asimismo, éste último se expone a medida que se analizan los resultados obtenidos. También, en cada capítulo se señalan las respectivas conclusiones y la bibliografía consultada. De manera que, a continuación, sólo se presenta una generalización de los propósitos del trabajo de investigación doctoral.

En el capítulo 1 se determinan las características y propiedades de la fibra y del jugo de fique producido en el departamento de Santander (Colombia), al igual que el tratamiento químico superficial al que fue sometido la fibra y sus efectos sobre la misma, teniendo en cuenta su carácter hidrofóbico. La fibra fue sometida a un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio, atendiendo a la concentración de la solución alcalina, del ácido y el tiempo de exposición. Para caracterizar la fibra de fique y el efecto del tratamiento sobre ésta se emplearon las técnicas de espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), microscopía óptica (MOP), microscopía electrónica de barrido (MEB), ensayo de tracción y de absorción de agua.

En el capítulo 2 se estudia el comportamiento físico-mecánico de un concreto modificado con fibra y jugo de fique a través del cumplimiento de tres objetivos. El primero se enfoca en definir el efecto de la fibra con y sin tratamiento superficial sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto convencional, teniendo en cuenta la adherencia fibra-concreto; el segundo, busca determinar el efecto del empleo de jugo de fique sobre las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto, atendiendo a su capacidad como aditivo inclusor de aire; por último, se determina la mezcla más adecuada de concreto con fibra y jugo adicionada al tiempo.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el capítulo 2, se fabricó y caracterizó el concreto en estado fresco y endurecido. Se evaluó el material constituyente del concreto y de acuerdo a los resultados obtenidos se elaboró el diseño de mezcla siguiendo el método ACI 211; la evaluación de las propiedades mecánicas se realizó sobre cilindros y viguetas. En primer lugar, se elaboró y ensayó el concreto simple, luego el concreto con fibra de fique y posteriormente el concreto con jugo de fique; una vez se determinaron las mezclas con fibra y jugo de fique con los resultados más favorables, se procedió a fabricar y caracterizar la mezcla que contenía a su vez concreto, fibra y jugo de fique. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la adición de fibra fueron la cantidad y la longitud. Para la caracterización del concreto en estado fresco se realizaron las pruebas de asentamiento, pH y masa unitaria (densidad); para la caracterización del concreto en estado endurecido se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, resistencia a la flexión, densidad y porosidad, MEB y difracción de rayos X (DRX).

El capítulo 3 analiza el efecto del ataque por dióxido de carbono (CO_2) sobre el concreto adicionado con fibra y jugo de fique. En esta parte de la investigación se efectuaron 2 pruebas que permitieron estudiar el comportamiento de los concretos

fabricados y estudiados en el capítulo anterior; las cuales fueron el ensayo de conductividad eléctrica en concreto endurecido y carbonatación acelerada. La primera prueba se llevó a cabo en un equipo marca Giatec Scientific Perma 2, dispositivo especial para este tipo de ensayo, la prueba se ejecutó siguiendo la norma ASTM C1760. En la segunda prueba, la caracterización mecánica se llevó a cabo mediante el ensayo de resistencia a la compresión y con el fin de estimar la profundidad de penetración del CO_2 en el material se usó fenolftaleína al 1,0%; asimismo, los cambios provocados por el CO_2 sobre las fases cristalinas fueron analizados por medio de DRX.

Por último, vale la pena reconocer que la fibra de fique fue suministrada por la *Empresa Cooperativa de Fibras de Santander-Ecofibras Ltda*, ubicada en el municipio de Curití en Santander. El jugo de fique fue extraído de las hojas provistas por la empresa de artesanías *María Canela*, situada en el mismo municipio. Asimismo, destacar el apoyo ofrecido por el Centro de Microscopía de la Universidad de los Andes para la realización de la microscopía electrónica de barrido (MEB) de toda la investigación durante la pasantía doctoral.

1. CARACTERÍSTICAS DEL JUGO Y LA FIBRA DE FIQUE CON Y SIN TRATAMIENTO SUPERFICIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El fique es una planta nativa colombiana de cuya hoja se extrae fibra mediante procesos mecánicos. A nivel nacional se destaca la fibra de fique debido a su disponibilidad e interesantes propiedades mecánicas, con resistencia al calor y contra la humedad, a pesar de sufrir descomposición en ambientes alcalinos o por ataque biológico[1]. Además, su cultivo sobresale de otros gracias a su estabilidad, baja exigencia para producción, resistencia a fenómenos meteorológicos y flexibilidad en los tiempos de cosecha[2]. En Colombia se producen cerca de treinta mil (30.000) toneladas de fibra al año, principalmente en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander y Antioquia[3]. El proceso productivo del fique se divide en cuatro (4) etapas principales: cultivo, beneficio, manufactura e industria. Durante el proceso de beneficio de la planta de fique se produce aproximadamente 4% de fibras útiles para la industria, el otro 96% corresponde a jugo, bagazo y estopa[4]. La fibra útil es ampliamente usada en la fabricación de hilados, cuerdas, alfombras, esteras, artesanías y sacos y empaques para productos agrícolas. Se podría considerar a la fibra de fique como un material compuesto micro reforzado, en el cual, las fibrillas de celulosa están rodeadas por una matriz de unidades amorfas de hemicelulosa y lignina, además de ceras y grasas que protegen la pared celular de la fibra.

---

[1] TARA SEN, H. N.; JAGANNATHA, R. Application of Sisal, Bamboo, Coir and Jute Natural Composites in Structural Upgradation. En: International Journal of Innovation, Management and Technology. Junio 2011, Vol 2, No 3, p 187.

[2] SECRETARIA DE AGRICULTURA DE SANTANDER. Hablemos de fique en Santander y Colombia. Curití.: Cohilados del Fonce S.A., 2005. p.42.

[3] MOJICA PIMIENTO, Amilcar; PAREDES VEGA, Joaquín. El cultivo de fique en el Departamento de Santander. Bucaramanga: Centro Regional de Estudios Económicos Bucaramanga, 2004, p. 24.

[4] MINISTERIO DEL AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guía ambiental del subsector fiquero. Segunda edición, Bogotá D.C: Panamericana Formas e Impresos, 2006, p. 25.

El jugo de fique es una suspensión verde, de olor fuerte con un pH variable entre 5 y 6, de características variables que son dependientes de la edad de la planta, la estación del año y las características del suelo. Sus constituyentes son agua, celulosa, minerales, materia orgánica y amorfa (sacarosa, proteínas, nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, saponinas y sapogeninas)[5]. Se estima, que anualmente la producción de fique produce 720.000 toneladas de residuo de desfibrado, lo cual se convierte en un problema ambiental al contaminar las fuentes de agua cercanas a los sitios de producción debido a la lenta biodegradación asociada a los altos contenidos de saponinas y fenoles[6].

Por otra parte, se han evaluado múltiples tipos de tratamientos superficiales aplicados a las fibras. Uno de los más importantes es la mercerización o tratamiento alcalino o alcalinización, el cual consiste esencialmente en sumergir la fibra en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) por un determinado periodo de tiempo, elevando o no la temperatura, para luego neutralizarla a través de una solución de ácido suave[7]. Dentro de las características que presenta este proceso se encuentran las variaciones que se producen sobre la estructura y las propiedades mecánicas de las fibras tratadas, y que generalmente contribuyen con el mejoramiento del desempeño mecánico[8]. A pesar de ser un tema bastante amplio y estudiado en distintas fibras, con base en la revisión bibliográfica realizada, solo el 13% de las investigaciones y publicaciones correspondieron a fibra de fique. En este trabajo, se propone una modificación superficial de la fibra de fique para su uso en la fabricación de materiales compuestos de matriz cementicia.

---

[5] LOZANO RIVAS, William Antonio. Uso del extracto de fique (furcraea sp.) como coadyuvante de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales y como disruptor del proceso de nitrificación para la recuperación de cuerpos de agua hipereutrofizados. Tesis Doctoral en Biotecnología. La Rábida: Universidad Internacional de Andalucía, 2011, p 26-27.

[6] JARAMILLO ZAPATA, Leyla Yamile. Evaluación del jugo de fique como aditivo oclusor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto. Tesis Maestría en Ingeniería. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009, p. 16.

[7] CASTRO, Cristina, et al.: Determinación de condiciones óptimas para el tratamiento alcalino de fibras de fique empleadas como reforzante de materiales compuestos. En: Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia. 2007, vol.30, no.2., p. 137.

[8] Ibid., p. 137.

En general, las propiedades de las fibras dependen de: la fuente, edad, especie, parámetros del procesamiento y la estructura interna, incluyendo constituyentes químicos[9]. Teniendo en cuenta lo anterior para el presente estudio, se usó la misma variedad de fique para la fibra y el jugo, correspondiente a *Fique cenizo* (*Furcraea cabuya trel*). La fibra de fique fue suministrada por la Empresa Cooperativa de Fibras de Santander-Ecofibras Ltda, ubicada en el municipio de Curití en Santander, siendo extraída de las hojas de la planta y en la cantidad suficiente para la realización de toda la investigación. Por su parte, cada vez que se realizaron pruebas o se fabricaron muestras de concreto que involucraban el uso del jugo de fique, éste fue extraído de las hojas, siendo éstas provistas por la empresa de artesanías María Canela, también ubicada en Curití.

Son 2 los objetivos que se abordan en este capítulo. El primero de ellos consistió en determinar las características y propiedades del jugo y la fibra de fique, en estado de recepción, provenientes del proceso de producción que se lleva a cabo en Santander; el segundo se orientó a determinar un tipo de tratamiento químico superficial para la fibra de fique atendiendo a su carácter hidrofóbico, adherencia y degradación química según el ambiente ofrecido por la solución de poro del concreto. Inicialmente, se presenta la caracterización del jugo de fique, su pH, la formación de espuma, la cantidad de sólidos y su composición química. Entre los resultados encontrados resalta que el jugo es de carácter ácido y que disminuye su poder espumante con el pasar de los días después de su extracción, además que tiene un alto contenido de agua en su composición. Posteriormente, se aborda la fibra de fique y su tratamiento alcalino, a diferencia de otras investigaciones, en esta disertación de tesis se realizó a temperatura ambiente con baja concentración de NaOH y periodos de tiempo cortos. Para el tratamiento de la fibra se tuvieron en cuenta los parámetros: la concentración de la solución alcalina y del ácido, y el

[9] MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K.G. Structure properties of some vegetables fibers. En: Journal of Materials Science. 1984, no.19., p. 3929.

tiempo de exposición. Para caracterizar la fibra de fique y el efecto del tratamiento sobre la fibra se usaron distintas técnicas de caracterización: espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), microscopía óptica (MOP), microscopía electrónica de barrido (MEB), ensayo de tracción y de absorción de agua. Al final de la investigación se pudo observar que la fibra de fique sin tratamiento tiene un alto contenido de celulosa y elevada resistencia a la tracción, además, bajo las condiciones del tratamiento alcalino, la fibra experimentó cambios en su estructura y comportamiento físico y mecánico.

1.2 METODOLOGÍA

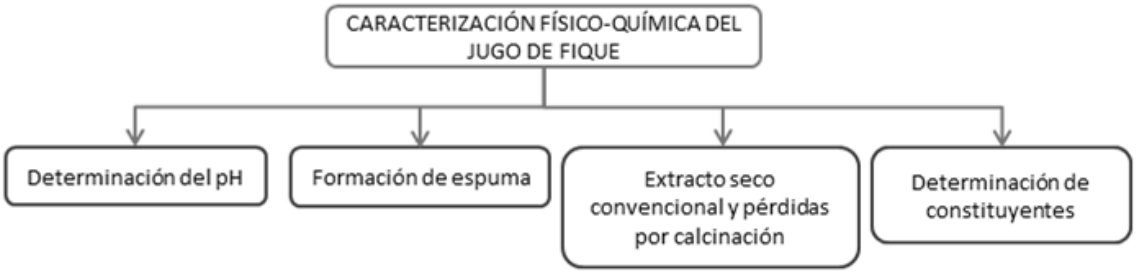
El procedimiento llevado a cabo para la caracterización del jugo y la fibra de fique con tratamiento químico superficial, se presenta a continuación:

1.2.1 Caracterización físico-química del jugo de fique. El jugo de fique se obtuvo por molienda de las hojas de *Fique Cenizo* (*Furcraea cabuya trel*[10]). La extracción se realizó en un trapiche destinado para este propósito disponible en la Universidad Industrial de Santander, exprimiendo las hojas de fique y filtrándolo en tamiz con malla de 2 mm^2. La temperatura del jugo de fique y el tiempo posterior extracción se definieron para esta investigación. Todas las muestras de jugo usadas se ensayaron 24 horas después de su extracción manteniéndolas a una temperatura de 5°C, lo anterior con el fin de evitar la fermentación del jugo. En este sentido, Jaramillo[11] sugiere conservar el jugo a temperatura inferior a 15°C y así evitar su rápida fermentación; por su parte Lozano[12] mantuvo el extracto a 3°C. Con el jugo a 5°C se determinó el pH, la formación de espuma, la cantidad de sólidos, cenizas y composición química. A continuación, se describe cada uno de los ensayos realizados y en la Figura 1 se presenta el proceso metodológico.

[10] FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES, ARTESANOS Y PROCESADORES DE FIQUE. Manual de asistencia técnica del cultivo de fique. Colombia.: Ministerio de Agricultura, 2017. p. 15.
[11] JARAMILLO ZAPATA. Op. Cit., p. 47.
[12] LOZANO RIVAS. Op. Cit, p. 53.

La determinación del pH se ejecutó siguiendo la norma internacional ASTM E70[13], usando un equipo *sensION+pH1* con sensibilidad de ±0,01 pH. Para la medición se introdujo el electrodo en un vaso de precipitado con 150 ml de jugo de fique durante un minuto, al finalizar este tiempo se registraron las tres medidas de pH que presentaran variación de ±0,01. Ahora bien, con fines de comparación con el jugo de fique, este procedimiento también se llevó a cabo al aditivo comercial de *sika – plastocrete* que se caracteriza por ser un aditivo plastificante e inclusor de aire.

Figura 1. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del jugo de fique



El ensayo de formación de espuma se llevó a cabo según ASTM D1173[14]. En esta prueba se utilizaron una bureta de 200 ml y una probeta de 1000 ml. Inicialmente, a la probeta se le adicionaron 100 ml de jugo de fique y se ubicó la bureta a 450 mm, longitud medida entre la punta de la bureta y la superficie del jugo de fique de la probeta. Posteriormente, se abre la llave de la bureta permitiendo que cayeran los 200 ml de jugo en la probeta, se contabilizó el tiempo de caída (como parámetro de control) y se midió el volumen de espuma formado en la probeta en cuatro tiempos, a saber: 0, 30, 180 y 300 segundos. Este volumen es proporcional al aire remanente en la espuma del jugo. En la Figura 2 se ilustra el montaje y el procedimiento llevado a cabo. Allí se aprecia la cantidad de espuma que forma el jugo de fique durante y

[13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions With the Glass Electrode. West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. 6p. ASTM E70.
[14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Foaming Properties of Surface-Active Agents. West Conshohocken United States.: ASTM, 2015. p. 1-3. ASTM D1173.

después de la caída, lo cual indica el poder espumante que tiene este subproducto de la industria del fique.

Además, con el fin de conocer el comportamiento, a través del tiempo, de la formación de espuma y pH del jugo, se ejecutaron ensayos a las muestras de jugo hasta el día 30 posterior a su extracción, siguiendo un intervalo diario durante la primera semana, luego a los 15 días, y por último en el día 30, conservando siempre la temperatura de las muestras a 5°C. Fueron analizadas 3 muestras de jugo de fique en cada día de ensayo.

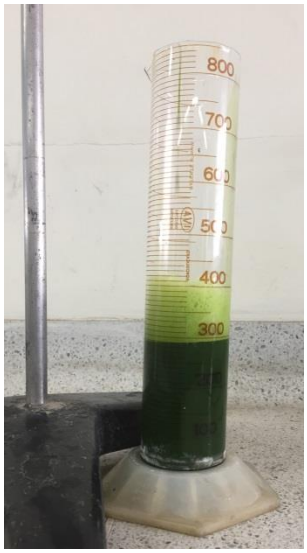
Figura 2. Ensayo de formación de espuma



2a. Montaje



2b. Caída del jugo de fique



2c. Volumen de espuma

Por otra parte, se llevaron a cabo los ensayos de extracto seco convencional (cantidad de sólidos) y pérdidas por calcinación (cenizas)[15]. Se utilizó una balanza analítica marca *Radwag XA 210.3Y*, con capacidad máxima de 210 g y precisión de 0,01 mg. Para estas pruebas se pesaron entre 5 g y 10 g de jugo de fique, se introdujeron en una estufa de secado marca *Memmert UN55* a 105°C hasta masa

[15] JARAMILLO ZAPATA. Op. cit., p. 50-53.

constante, determinando la cantidad de material sólido que contiene el jugo de fique; posteriormente se sometió el extracto seco a calcinación en un horno *Heraeus* a 850°C durante 2 horas, para así determinar el total de cenizas presente en el jugo. Para estos ensayos fueron analizadas 3 muestras de jugo de fique.

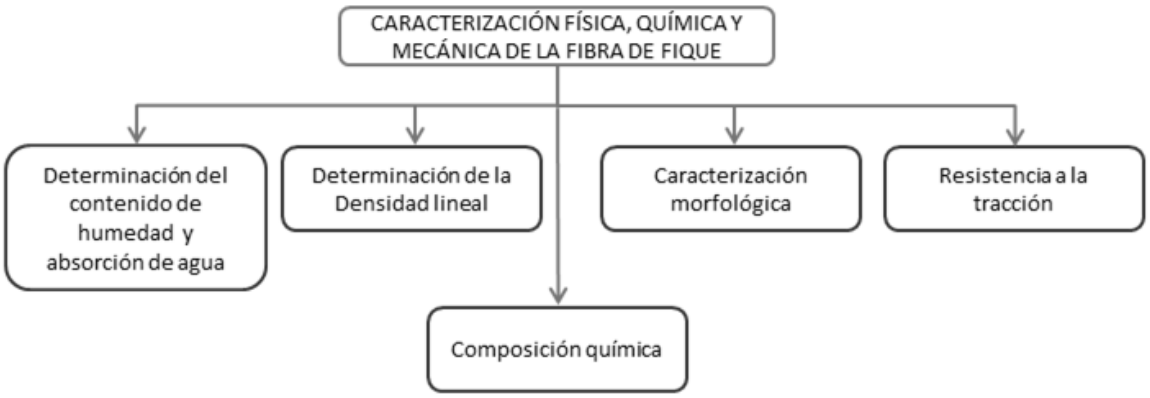
La caracterización química del jugo de fique se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos–CICTA de la Universidad Industrial de Santander–UIS. En este sentido, se analizó el contenido de calcio (Ca), potasio (K), fósforo (P), nitrógeno (N); proteína y sacarosa. El calcio y el potasio fueron analizados por el remanente de ceniza y cuantificado por absorción atómica, el fósforo fue analizado por método espectrofotométrico, la sacarosa se cuantificó por cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC-RI, por sus siglas en inglés); por su parte, la proteína y el nitrógeno fueron analizados por el método de Kjeldahl que consiste en la determinación de nitrógeno total y posterior conversión a proteína. Para la caracterización química fueron analizadas 2 muestras de jugo de fique.

1.2.2 Caracterización física, química y mecánica de la fibra de fique. Se caracterizó la fibra de fique, en estado de recepción, proveniente del proceso de producción que se lleva a cabo en Santander. La fibra fue suministrada por la Empresa Cooperativa de Fibras Naturales de Santander (Ecofibras Ltda). El tipo de fique empleado fue la variedad *Fique Cenizo* (*Furcraea cabuya trel*). La caracterización consistió en la determinación de propiedades físicas, químicas y mecánicas. Los ensayos se describen a continuación y en la Figura 3 se muestra el procedimiento utilizado para su caracterización:

En primer lugar, se determinaron las siguientes propiedades físicas: contenido de humedad, absorción de agua, densidad lineal y la morfología de la superficie. Con relación al contenido de humedad y la absorción de agua, se prepararon manojos con 20 fibras de 150 mm de longitud, posteriormente se pesaron en la balanza analítica *Radwag XA 210.3Y* y se introdujeron en la estufa de secado *Memmert* a

105°C donde se mantuvieron hasta masa constante. Con estos datos se calculó el contenido de humedad. Luego se sumergieron durante 24 horas en un vaso de precipitado con agua, posteriormente se extrajeron y se secó con papel absorbente el exceso de humedad para pasar a ser pesada, con los resultados obtenidos se determinó la absorción de agua. Para ambas pruebas fueron analizadas 6 manojos de 20 fibras de fique.

Figura 3. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del jugo de fique



La densidad lineal se hizo bajo la norma ASTM D1577[16] siguiendo el método gravimétrico de peso de manojos de fibra, el cual consistió en pesar fajos de 20 fibras de fique cada uno, con longitudes entre 50 y 150 mm, la prueba se ejecutó en cuatro corridas, siendo ensayados 44 manojos de 20 fibras. Con los resultados obtenidos se calculó la densidad lineal en Tex (unidad fundamental del Sistema Tex, que expresa la masa en gramos de un kilómetro de hilaza[17]). Ray y Sarkar[18] también usaron el método gravimétrico para la determinación de la densidad lineal.

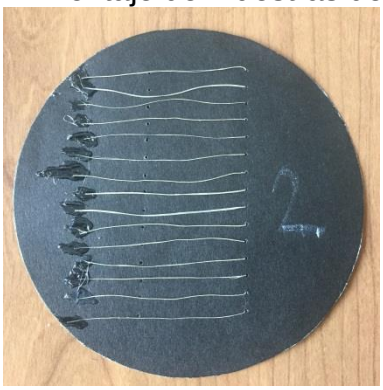
[16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Linear Density of Textile Fibers. West Conshohocken United States.: ASTM, 2012. p. 1-10. ASTM D1577.
[17] NORMA TECNICA ECUATORIANA. Textiles. Sistema universal de numeración para los hilados (Sistema Tex). Ecuador.: NTE INEN, 1990. p. 1-10. NTE INEN 207.
[18] RAY, Dipa; SARKAR, B. K. Characterization of alkali treated jute fibers for physical and mechanical properties. En: Journal of Applied Polymer Science. 2001, vol. 80., p. 1014.

Por otra parte, los componentes orgánicos de la fibra, a saber; celulosa, hemicelulosa y lignina, fueron determinados mediante los métodos de Kurschner y Hoffer, Klason y Jayme–Wise, respectivamente, por el Laboratorio de Aguas y Suelos del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales–CEIAM de la UIS. También se analizó la fibra a partir de la identificación de grupos funcionales presentes mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Este ensayo lo ejecutó el Centro Integrado de Laboratorios de Ingeniería Química–CILIQ de la UIS; el equipo usado fue espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier modelo IR Tracer-100, marca Shimadzu con sistema de reflectancia atenuada ATR y porta muestras Dia/Se-Zn. Las condiciones de operación se realizaron en un rango de 400 – 3500 cm^{-1} con resolución de 2 nm y número de escaneos 34. Además, mediante espectroscopía por dispersión de energía (EDS, por sus siglas en inglés) se determinaron diferentes elementos químicos en la fibra de fique. Fue analizada una muestra de fibra en cada prueba mencionada.

Para conocer la condición superficial de la fibra se realizó la caracterización morfológica mediante microscopía óptica (MOP) y microscopía electrónica de barrido (MEB) en sentido longitudinal y transversal a distintos aumentos. La microscopía óptica se llevó a cabo utilizando un microscopio marca *Olympus GX71* con capacidad de 50X a 2000X aumentos. Para la observación longitudinal se prepararon fibras de 50 mm de longitud ubicadas sobre una superficie de color negro. Para la observación transversal, la fibra se encapsuló en resina epóxica y se midió el diámetro de la fibra, lo anterior con el fin de caracterizar dimensionalmente la fibra natural. Asimismo, se observó la fibra en condiciones de alto vacío, empleando un microscopio electrónico de barrido perteneciente a la Universidad de los Andes marca JEOL, modelo JSM 6490-LV que permite realizar análisis químico mediante EDS. Para la observación, las muestras se fijaron en una cinta de grafito y se recubrieron con una capa delgada de oro (Au) siendo observadas a 15 y 20 kV entre 50X y 2000X de manera longitudinal y transversal. Para la observación

mediante MOP fueron analizadas 270 muestras de fibra, mientras que con el MEB se observaron 15. En la Figura 4 se muestra el montaje llevado a cabo para la observación en los microscopios.

Figura 4. Montaje de muestras de fibra para observación en MOP y MEB



4a. Montaje para observación longitudinal en MOP



4b. Montaje para observación en MEB

Una vez se estableció la densidad lineal, se determinaron las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad usando una máquina universal de ensayos marca MTS, referencia 318-50 con celda de carga de 50 toneladas, siguiendo la norma ASTM D3822[19]. Para el ensayo se elaboraron 80 probetas de 20 fibras cada una y 250 mm de longitud; de las cuales 40 fueron para la fibra sin tratamiento, 20 para la fibra tratada durante 5 minutos y otras 20 para la fibra con tratamiento de 10 minutos. En cada extremo de las probetas se implementó un broche y se recubrieron 60 mm de cada extremo de la probeta con cinta adhesiva con el fin de mantener las fibras unidas y que no se rompieran al momento de ser apretadas por las mordazas de la máquina universal de ensayos, como se muestra en la Figura 5. En este proyecto se propuso un método alternativo, mediante el uso de un sistema de macro-fuerza, esto con el fin de reducir la dispersión estadística

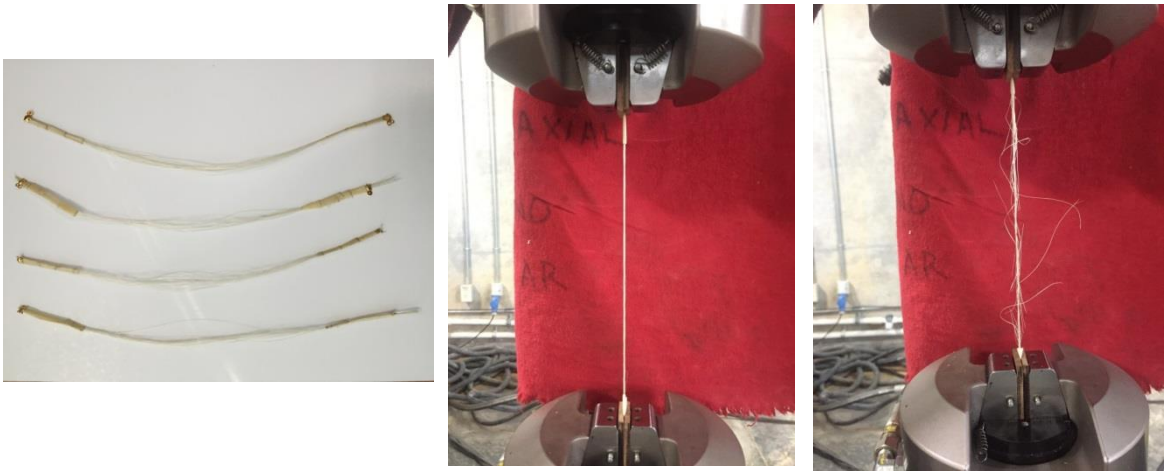
[19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. p. 1-10. ASTM D3822.

de los resultados de las pruebas. El ensayo se realizó a una velocidad de 1 mm/min, rango de carga de 350 N y longitud efectiva calibrada de 150 mm. Esta velocidad de aplicación de carga también fue usada por Mukherjee[20] y Cao et al[21], otros autores han usado 0,1mm/min[22], 2mm/min[23] y 4mm/min[24]. Por su parte, mantener constante la longitud calibrada se hizo con el fin de evitar su influencia sobre la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. Con los resultados obtenidos, y según la norma mencionada, se evaluaron la resistencia a la rotura y el módulo de elasticidad en cN/tex. Autores como Vangueluwe[25] han reportado la resistencia a la tracción de la fibra en estas unidades.

Para comparar las propiedades mecánicas de la fibra con lo reportado en la bibliografía por la mayoría de investigaciones se determinó su valor en relación con el área de su sección transversal (la resistencia a la tracción en MPa y el módulo de elasticidad en GPa). Para determinar el diámetro y el área de la sección transversal de la fibra de fique se usó el software de procesamiento de imágenes *Image J* en las imágenes de la fibra obtenidas de manera transversal por medio de MOP y MEB. Mediante el trazado de líneas perpendiculares entre sí y midiendo su longitud se determinó el diámetro (Figura 6). Para calcular el área se utilizaron las imágenes logradas mediante MOP y MEB siguiendo el contorno de la fibra, este procedimiento se muestra en la Figura 7. Para la determinación del diámetro de la fibra y el cálculo del área se usaron para ambas mediciones 60 muestras de MOP y 10 de MEB.

[20] MUKHERJEE. Op. cit., p. 3932.
[21] CAO, Y.; SHIBATA, S. y FUKUMOTO, I. Mechanical Properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. Part A, 2006. Revista Science Direct, 37, 423-429. Disponible en www.elsevier.com/locate/compositesa.
[22] DE ANDRADE SILVA, Flavio; CHAWLA, Nichilesh y DIAS DE TOLEDO FILHO, Romildo. Tensile behavior high performance natural (sisal) fibers. 2008. Revista Composites Science and Technology, 68, 3438-3443. Disponible en www.elsevier.com/locate/compscitech.
[23] OKSMAN, Kristiina, et al. Morphology and mechanical properties of unidirecional sisal epoxy composites. En: Journal of Applied Polymer Science. 2002, vol. 84., p. 2360.
[24] ISAZA RUIZ, Marllory, et al. Caracterización mecánica y morfológica de fibras de fique con potencial uso acústico. En: VIII Congreso Internacional de Materiales. 2015, p. 3.
[25] VANGUELUWE, L. Influence of strain rate and yarn number on tensile test results. En: Textile Research Journal. Octubre, 1992, p. 587.

Figura 5. Probetas para ensayo de tracción



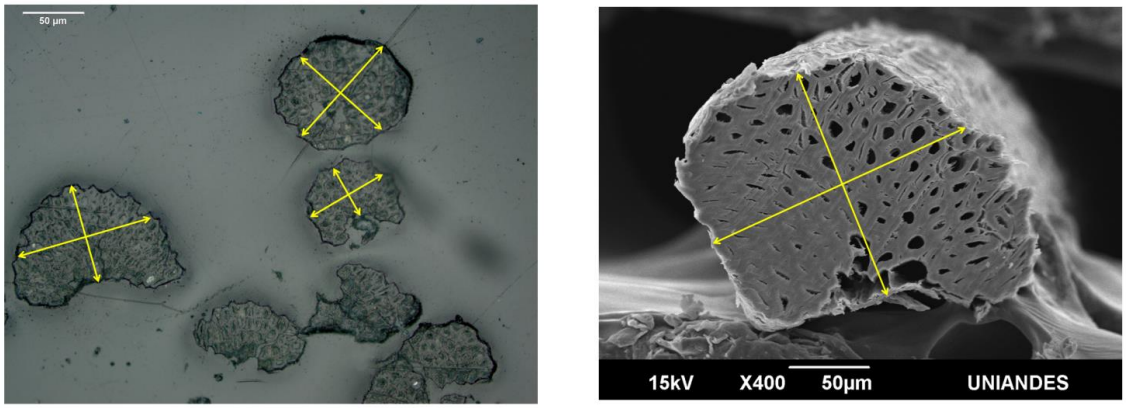
5a. Probetas para ensayo de tracción

5b. Probeta en la máquina antes del ensayo

5c. Probeta en la máquina después del ensayo

Teniendo en cuenta que las fibras celulósicas son altamente hidrofílicas y que su módulo de elasticidad podría verse afectado al depender fuertemente de la humedad relativa ambiental[26] el ensayo de tracción se realizó en una sola corrida.

Figura 6. Toma del diámetro de la fibra de fique

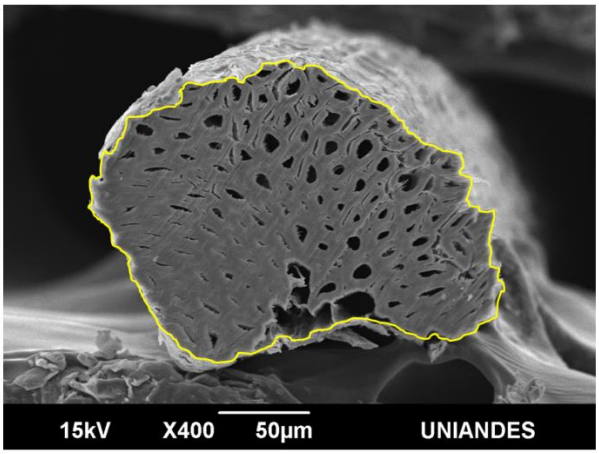


6a. Medida del diámetro en MOP (200X)

6b. Medida del diámetro en MEB (400X)

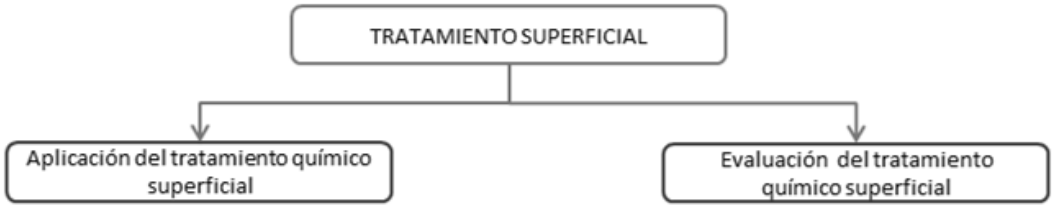
[26] YAN, Libo; KASAL, Bohumil y HUANG, Liang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. Part B, Febrero 27 de 2016. Revista Science Direct, 92, 94. (Recuperado el 11 mayo 2017). Disponible en www.elsevier.com/locate/compositesb.

Figura 7. Estimación del área de la sección transversal de la fibra de fique



1.2.3 Tratamiento superficial de la fibra de fique. Como se muestra en la Figura 8, inicialmente se realiza un tratamiento químico superficial a las fibras y se procede enseguida con su evaluación.

Figura 8. Diagrama del proceso metodológico para el tratamiento superficial de la fibra



Se realizó un tratamiento a la fibra con el fin de modificar su condición superficial, el cual consistió en su inmersión en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 3% y ácido acético (CH_3COOH) al 5% a 25°C con el fin de neutralizar la acción de la base, seguido de un lavado con agua destilada con el propósito de remover el exceso de ácido. Por último, las fibras tratadas se secaron al aire durante 72 horas. El procedimiento se ejecutó en distintos tiempos de permanencia de la fibra sumergida en los reactivos, a saber: en la base a 5 y 10 minutos, mientras que en

el ácido se ensayó durante 120, 60, 30 y 3 segundos, este último, representa la entrada por salida (baño de parada) de la fibra en el ácido.

Como parámetro de control se tuvo en cuenta que el tratamiento no modificara el pH ácido natural de la fibra una vez terminara su aplicación, es decir, la acidez o basicidad de la fibra una vez terminaba el tratamiento. Esto fue determinado de forma cualitativa mediante el método colorimétrico de tirillas de papel de pH[27,28]. Xue et al[29], Mwaikambo[30] y Ray[31] reportaron procedimientos similares al descrito usando los mismos reactivos para diferentes fibras celulósicas; por su parte Castro et al[32] aplicaron un procedimiento equivalente en fibras de fique. Las fibras tratadas fueron evaluadas después de definir los tratamientos que cumplieron con el parámetro de control. Para su evaluación se realizaron los ensayos de absorción de agua, resistencia a la tracción, MOP, MEB y FTIR. Las pruebas se llevaron a cabo para las fibras tratadas durante 5 y 10 minutos, en este sentido, para el ensayo de absorción de agua fueron ensayadas 12 probetas, para la resistencia a la tracción se ensayaron 40 probetas, asimismo, se observaron mediante MOP y MEB, 90 y 30 muestras de fibra respectivamente, mientras que 2 muestras de fibra de fique se examinaron con FTIR. Los resultados obtenidos permitieron definir el tratamiento para la fibra de fique que fue usado en el desarrollo de esta investigación. En la Figura 9 se muestra el montaje para el tratamiento de la fibra. En el Anexo B se encuentra el resumen de las pruebas llevadas a cabo y la cantidad de muestras ensayadas para la determinación de las propiedades de la fibra y el jugo de fique.

[27] BERETA, Andres, et al. Medición de pH del suelo con papel reactivo. En: Agrociencia Uruguay. Julio-Diciembre, 2015, vol. 19, no. 2, p. 68-74.
[28] ZHOU, Feng; CHENG, Guangxu; JIANG, Bo. Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers. Diciembre 16 de 2013. Revista Applied Surface Science, 292(2014), 806-812. Disponible en: www.elsevier.com/locate/apsusc.
[29] XUE, Li; LOPE G., Tabil; SATYANARAYAN, Panigrahi. Chemical Treatments of Natural Fiber for used in Natural Fiber Reinforced Composites. En: J Polym Environ. Enero, 2007, p. 27-28.
[30] MWAIKAMBO, Leonard Y.; ANSELL, Martin P. Chemical modification of hemp, sisal, yute and kapok fibers by alkalization. En: Journal of Applied Polymer Science. 2002, vol. 84, p. 2226.
[31] RAY. Op. cit, p. 1014.
[32] CASTRO. Op. cit, p. 138.

Figura 9. Montaje para el tratamiento superficial de la fibra



1.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados y análisis obtenidos con la ejecución de la metodología expuesta en la sección 1.2. En primer lugar, se abordará el jugo de fique y posteriormente la fibra.

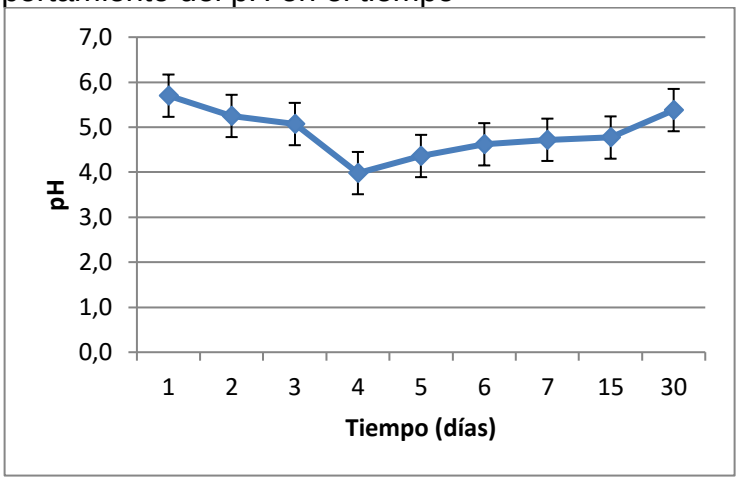
1.3.1 Caracterización físico – química del jugo de fique. El jugo de fique presenta un color verde y es de olor fuerte. Como se mencionó en la metodología, se estableció el pH del jugo 24 horas después de su extracción, dando como resultado un pH ácido de 5,70±0,53 y para el aditivo comercial (plastocrete) un pH de 4,90±0,007; por su parte, para el jugo de fique Jaramillo[33] y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la guía ambiental del subsector fiquero[34] reportan entre 4 y 5 unidades de pH.

El comportamiento del pH del jugo durante los 30 días presentó variaciones, pero su carácter continuó siendo ácido. En la Figura 10 se muestra el comportamiento del pH del jugo de fique durante los 30 días; en esta figura se aprecia que el jugo sufre una disminución en el pH cuatro días después de su extracción y presenta un mínimo de 3,98, siendo una diferencia significativa con relación al primer día

[33] JARAMILLO ZAPATA. Op. cit, p. 85.
[34] MINISTERIO DEL AMBIENTE. Op. cit., p. 27.

(pH=5,7). A partir del quinto día, se observa que el valor del pH empieza a aumentar hasta el día 30, en el cual el pH corresponde a 5,38; de manera semejante Lozano[35] reportó valores de pH para el jugo de fique crudo y decantado de 4,61 y 4,91 respectivamente.

Figura 10. Comportamiento del pH en el tiempo



El comportamiento del pH se explica a partir de la acción de microorganismos, bacterias acidogénicas, que durante el proceso de fermentación del jugo aprovechan los azúcares producto de la hidrólisis de la saponina convirtiéndola en ácidos que ocasionan la reducción del pH[36]. Durante este proceso de fermentación del jugo se da la producción de tigogenina y hecogenina, sustancias que podrían asociarse a la disminución y posterior aumento del pH del jugo de fique. En este sentido, Benavides et al[37] estudiaron el tiempo de fermentación del jugo a los 2, 4 y 6 días, encontrando que para el día cuatro (4) los valores de tigogenina y hecogenina fueron los máximos y para el día seis (6) la cantidad de estos

[35] LOZANO RIVAS. Op. cit, p. 75.
[36] MENDOZA FLOREZ, Liliana Cristina. Evaluación del efecto de las saponinas furcraea ssp sobre el metabolismo microbiano de la mezcla lodo estiércol de cerdo y líquido ruminal para la producción de biogás a partir de bagazo de fique. Trabajo de grado para ingeniero químico. Bucaramanga. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2012, p. 31.
[37] BENAVIDES, Olga L., et al. Cuantificación de sapogeninas del jugo fresco y fermentado de fique (furcraea gigantea) mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-PDA). En: Información Tecnológica. 2012, vol. 23, no. 3, p.67-76.

compuestos disminuyó. Lo anterior fue explicado debido a la acción de microorganismos durante el proceso de fermentación del jugo[38,39], ya que la hidrólisis de las saponinas, inicialmente presentes en el jugo, produce un aumento de la cantidad detectada de hecogenina y tigogenina, pero al agotarse el sustrato más fácilmente aprovechable (la sacarosa) empezaría a presentarse una ruptura o transformación a sapogeninas[40]; por lo tanto, es probable que la formación de tigogenina y hecogenina, y la posterior formación de sapogeninas, esté relacionada con el comportamiento mostrado por el pH durante la fermentación del jugo de fique.

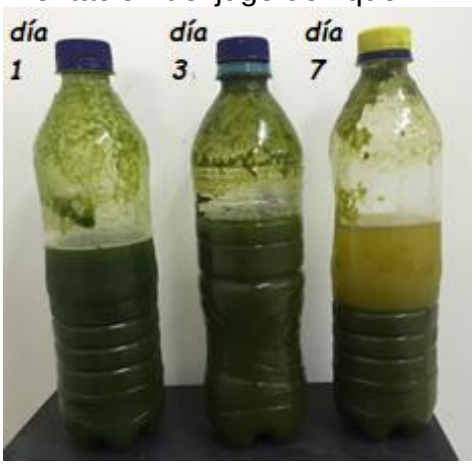
En la Figura 11 se presenta el proceso de fermentación del jugo de fique para los días 1, 3 y 7 después de su extracción de izquierda a derecha respectivamente. Allí se observa la separación de fases que se produce en el proceso fermentativo mediante la presencia de un decantado y un sobrenadante en el día 7. El sobrenadante es una sustancia de apariencia amarillo verdoso claro, compuesta en su mayoría por agua y ácidos grasos, por su parte el decantado es de color marrón verdoso oscuro, el cual es un precipitado de las geninas hidrolizadas parcialmente que se depositan en el fondo, lo que constituye un procedimiento natural para concentrar el material que contiene las sapogeninas[41], es decir, el decantado contiene la mayor concentración de sapogeninas[42].

Las saponinas, que son el principal agente activo en el jugo de fique, están conformadas por dos porciones: las gluconas (azúcares) y las agluconas (más conocidas como sapogeninas[43]). Sus propiedades son bien conocidas, por ejemplo, actúan como agentes surfactantes y tensoactivos[44] biodegradable, es decir, tienen

[38] Ibid., p. 73.
[39] OTERO R., Iván Darío, et al. Bacterias aisladas del jugo de fique con actividad antagónica sobre *Phytophthora Infestans* (Mont.) de Bary. En: Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial. Enero-junio, 2014, vol. 12, no. 1, p. 33.
[40] BENAVIDES, Olga L. Op. cit., p. 73.
[41] LOZANO. Op. cit., p. 34.
[42] Ibid., p. 53.
[43] Ibid., p. 21.
[44] Ibid., p. 5.

la capacidad de producir espuma debido a su poder surfactante, además disueltas en agua son capaces de reducir la tensión superficial y de actuar como disgregante de las grasas y aceites[45].

Figura 11. Estados de fermentación del jugo de fique



En la Figura 12 se puede apreciar el comportamiento en el tiempo del jugo de fique con relación a la formación de espuma durante el ensayo (300 segundos), 24 horas después de su extracción. En la Figura 13, se observa el cambio en el poder espumante del jugo de fique durante los 30 días que se estudió su comportamiento.

La Figura 13 muestra que a mayor maduración del jugo ocurre pérdida de estabilidad en la formación de espuma, lo que podría conllevar a afectar la estructura de poros en el concreto. Lo anterior se debe a la fermentación que sufre el jugo, la cual disminuye sus propiedades surfactantes; de la misma forma lo reportó Jaramillo[46].

[45] Ibid., p. 22.
[46] JARAMILLO. Op. cit., p. 90.

Figura 12. Formación de espuma del jugo de fique 24 horas después de extracción

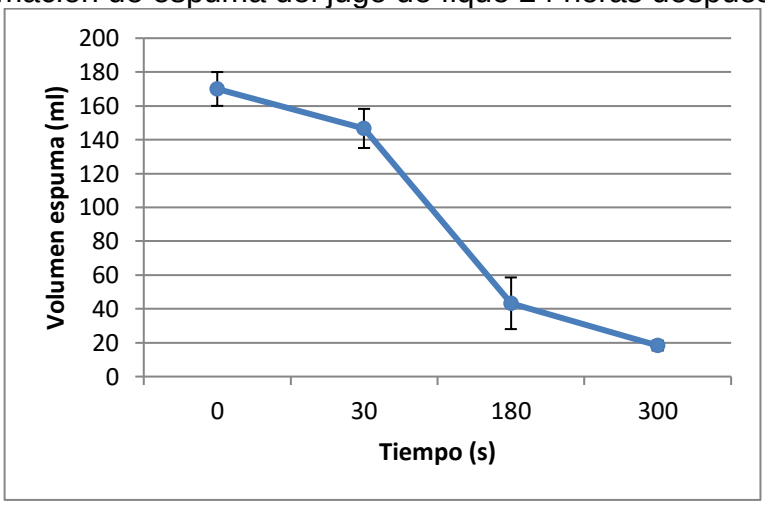
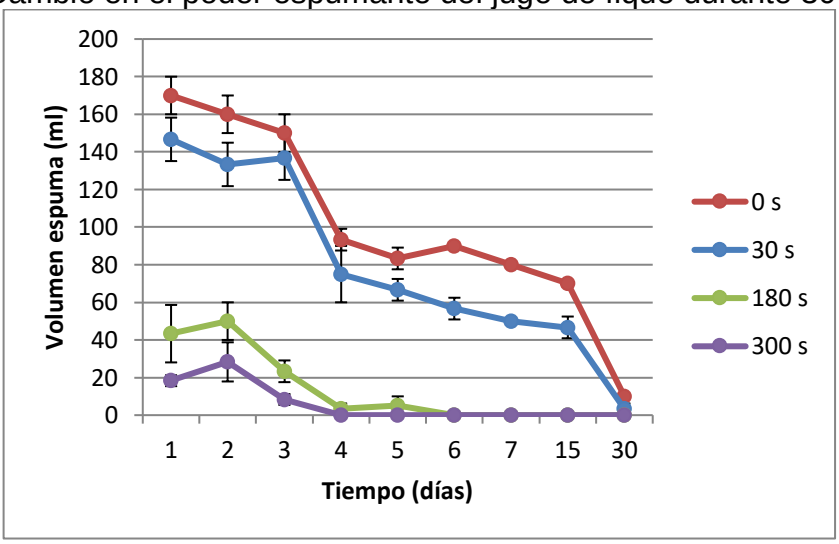


Figura 13. Cambio en el poder espumante del jugo de fique durante 30 días



Teniendo en cuenta que el pH del jugo de fique y la formación de espuma sufren cambios debido a la acción de microorganismos y la producción de sapogeninas, se estableció un tiempo de fermentación del jugo de 24 horas después de su extracción. Lo anterior, con el fin de aprovechar al máximo el poder espumante del jugo de fique para ser usado como aditivo en las mezclas de concreto.

Por otra parte, el ensayo de extracto seco convencional reportó un valor de 7,18±0,04% de materia seca presente en el jugo, indicando que en el jugo de fique el 92,82% corresponde a agua. Según el ensayo de pérdidas por calcinación se obtuvo que el jugo contiene 91,94±0,23% de materia orgánica, lo cual se explica por provenir de una planta. Estos resultados revelan la gran cantidad de agua y de materia orgánica presente en el jugo de fique, de la misma manera como lo reportó Jaramillo[47].

Los resultados del análisis de composición química del jugo de fique se muestran en la Tabla 1. Algunos autores como López[48] y la guía ambiental del subsector fiquero[49] reportan que en la composición del jugo de fique se encuentran azúcares y algunos elementos como Ca y P, a su vez, el manual para el cultivo de la Secretaría de Agricultura de Santander[50], reportan además N y K.

Tabla 1. Composición química jugo de fique

Parámetros	Resultado
Calcio (Ca)	210 g
Potasio (K)	222 g
Fósforo (P)	13,43 g
Nitrógeno (N)	0,11 %
Proteína	0,71 %
Sacarosa	0,51 %

1.3.2 Caracterización química y física de la fibra de fique. En primer lugar, se determinó el contenido de humedad y la absorción de agua de la fibra de fique.

[47] Ibid., p. 85.
[48] LOPEZ HIGUERA, Edinson David. Síntesis in-situ y caracterización de nano partículas de óxido de zinc (ZnO) sobre fibras de fique y su aplicación en la degradación de contaminantes en aguas. Tesis de grado en química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2013, p. 44.
[49] MINISTERIO DEL AMBIENTE. Op. cit., p. 25.
[50] SECRETARIA DE AGRICULTURA DE SANTANDER. Op. cit., p. 6.

Se obtuvo que la fibra en estado de recepción tiene 7,71±0,44% de humedad y que es capaz de absorber hasta 113,87±15,62% en peso de agua. En lo referente al contenido de humedad, Delvasto et al[51] reportó que el fique presenta 12% de humedad. Esta diferencia se explica a partir de la diferencia en la variedad de fique, condiciones de conservación de la fibra y la metodología usada para su determinación. Por otra parte, otros autores como Badrinath[52], Dias[53], Dittenber[54] y Sullcahuamán[55] reportaron valores de 10% y 11% de humedad en sisal.

Con relación al valor de absorción hallado en esta investigación corresponde al encontrado en sisal por Tara Sen[56], Pacheco[57], Yan[58] y Dias[59], sin embargo, difiere del encontrado por Delvasto[60] en fibra de fique. La absorción de agua se explica porque los polímeros que componen las paredes de la fibra contienen hidroxilos y otros grupos químicos que atraen el agua mediante enlaces de hidrógeno[61].

La densidad de la fibra se calculó mediante la ecuación (1). Con los datos de longitud y masa se ajustó un modelo lineal por mínimos cuadrados, el cual presentó coeficiente de correlación de 0,87. Con esto se obtuvo que la densidad lineal de la

---

[51] DELVASTO, S.; TORO, E. F.; PERDOMO, F.; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby. An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. Septiembre 12 de 2009. Revista Science DIrect. 24, 187-192. (Recuperado el 10 octubre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

[52] BADRINATH, R.; SENTHILVELAN, T. Comparative investigation on mechanical properties of banana and sisal reinforced polymer based composites. 2014. Revista Science Direct. 5, 2263-2272. (Recuperado el 15 julio 2016). Disponible en: www.elservier.com/locate/procedia.

[53] DIAS TOLÊDO FILHO, Romildo, et al. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. En: Revista Brasilera de Engenharia Agrícola e Ambiental. 1999, vol. 3, no. 2., p. 245-256.

[54] DITTENBER, David b.; GANGARAO, Hota V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. Diciembre 3 de 2011. Revista Science Direct. Part A 43, 1419–1429. (Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

[55] SULLCAHUAMÁN, J.A., et al. Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas. En: Memorias VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Octubre 23-25, 2007, p. 3.

[56] TARA SEN. Op. cit., p. 187.

[57] PACHECO TORGAL, Fernando; JALALI, Said. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibre. A review. Agosto 21 de 2010. Revista Science Direct. 25, 575-581. (Recuperado el 2 diciembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

[58] YAN. Op. cit., p. 97.

[59] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 252.

[60] DELVASTO. Op. cit., p. 188.

[61] Ibid., p. 188.

fibra de fique es de 21,44±0,79 tex. El resultado obtenido concuerda con el de Isaza[62], cuyo valor fue de 20 tex, y fue superior a los 16,55 tex hallados por Pérez[63]. Estas diferencias se podrían explicar, a pesar de tratarse del mismo tipo de fibra, en este caso fique, por la variabilidad entre los tipos de fique usados en las investigaciones. También se explica desde el punto de vista de la heterogeneidad que presentan las fibras naturales. En la Figura 14 se presenta el modelo ajustado para la longitud y la masa de cada fajo de 20 fibras.

$$T_d = \frac{10000 * W}{(L * N)} \qquad \textit{Ecuación (1)}$$

Donde:

T_d: promedio de densidad lineal de fibra (dtex)

W: masa del atado de la muestra (mg)

L: longitud del atado de muestra (mm)

N: número de fibras del manojo de muestra

Según los resultados obtenidos en esta investigación, químicamente las fibras de fique comprenden celulosa (~53%), hemicelulosa (~26%) y lignina (~21%). De la misma forma que en el sisal, se espera que contenga pequeñas cantidades de pectina, ceras y grasas[64], aunque estas tres (3) últimas no fueron determinadas en este estudio. García[65] reportó en su investigación que los contenidos (en %P/P) de celulosa y lignina en la fibra de fique fueron respectivamente de 73,8% y 11,3%. Por su parte Delvasto[66] encontró que la fibra de fique tiene 70% de celulosa y 10,1% de

[62] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 4.

[63] PEREZ GARCIA, Luis Alberto. Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos a base de fibra de fique y fibras sintéticas. Tesis de grado en Ingeniería Mecánica. Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe. Facultad de Ingeniería, 2014, p. 44.

[64] DIAS TOLÊDO FILHO, Romilho, et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. Diciembre 19 de 2008. Revista Construction and Building Materials. 23, 2409 – 2420. (Recuperado el 15 diciembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

[65] GARCIA VILLAMIZAR, Claudia Patricia. Obtención por hidrólisis ácida y caracterización de nano fibras de celulosa a partir del bagazo y la estopa de fique. Tesis de grado en Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2015, p. 20.

[66] DELVASTO. Op. cit., p. 188.

lignina. En la Tabla 2 se presenta la composición de los compuestos orgánicos básicos de la fibra de fique, los cuales se expresan en concentración porcentual en peso (%P/P).

Figura 14. Gráfica del modelo lineal ajustado de masa vs longitud

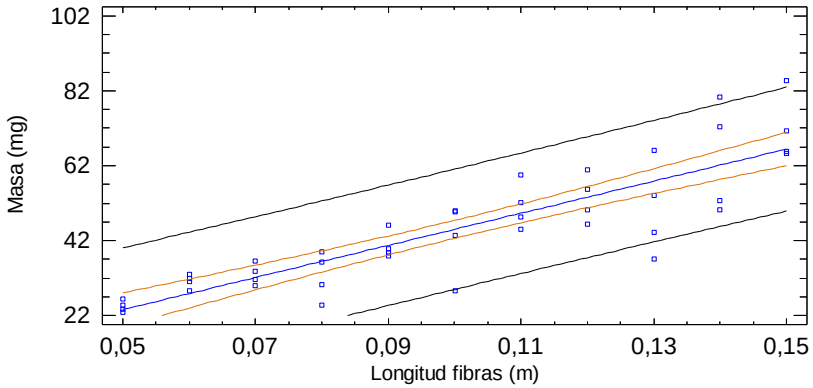


Tabla 2. Composición química de la fibra de fique

Parámetros	Unidad	Resultado	Método de análisis
Celulosa	%P/P	52,62	Kurschner Y Hoffer
Hemicelulosa	%P/P	26,04	Cálculo
Lignina	%P/P	21,34	Klason

En comparación con la fibra de sisal, son pocas las investigaciones que reportan la composición química de la fibra de fique; investigaciones como la de Li[67] indican que la fibra de sisal contiene 78% de celulosa, 10% de hemicelulosa y 8% de lignina, asimismo indicó que el sisal contiene 43%–56% de celulosa y de 7%–9% de lignina[68]. De Andrade[69] indicó que la fibra de sisal tiene aproximadamente de 54%–65% de celulosa, 12%–17% de hemicelulosa y 7%–14% de lignina.

[67] LI, Yan; WING MAI, Yiu; YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. En: Composites Science and Technology. 2000, vol. 60, p. 2040.
[68] Ibid., p. 2038.
[69] DE ANDRADE SILVA, Flavio, et al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. Noviembre 22 de 2009. Revista Construction and Building Materials, 24, 777-785. (Recuperado el 15 diciembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

Estas variaciones en la composición química de la fibra de fique y de sisal se deben a diferentes razones, entre las que se encuentran: la edad de la planta, el suelo, condiciones del cultivo, tipo y variedad de la planta y los métodos de medida, entre otros. Por ejemplo, Li [70] reportó que los contenidos de celulosa y lignina en la fibra de sisal cambian respectivamente de 49,62%–60,95% y de 3,75%–4,40% dependiendo de la edad de la planta.

En la naturaleza, la celulosa no se produce como una molécula aislada, sino que se encuentra como conjuntos de moléculas de celulosa individuales formando fibras[71], las cuales se constituyen como resultado de un proceso de hilatura de las moléculas individuales de celulosa a medida que se forman en el sitio de la biosíntesis[72]. Las cadenas de celulosa se empaquetan formando fibrillas elementales y alternando regiones cristalinas con regiones amorfas. La celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ es el principal componente estructural de la materia vegetal que confiere a las plantas resistencia mecánica, alta relación resistencia–peso y tenacidad. Se trata de un polímero polisacárido lineal formado por glucosa monosacárida $(C_6H_{12}O_6)$[73] que a su vez están unidas por enlaces glicosídicos β (1,4)[74], estos enlaces hidroxilo conceden a las fibras celulósicas propiedades hidrofílicas[75]. En las fibras naturales la celulosa está ordenada en microfibrillas unidas por hemicelulosa y lignina[76].

Por su parte, la hemicelulosa es un polisacárido isotrópico de cadena corta que se acomoda en una estructura aleatoria altamente ramificada y principalmente amorfa[77], a menudo muy similar a los azúcares y raramente cristalina[78]. Se

[70] LI. Op. cit., p. 2038.
[71] GARCIA VILLAMIZAR. Op. cit., p. 22.
[72] Ibid., p. 22.
[73] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411.
[74] LOPEZ HIGUERA. Op. cit., p. 17.
[75] LI. Op. cit., p. 2038.
[76] GARCIA VILLAMIZAR. Op. cit., p. 22.
[77] Ibid. p. 23.
[78] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411.

encuentra principalmente en la pared primaria estando químicamente ligada y orientada con las moléculas de celulosa[79]. Los azúcares de la hemicelulosa se mantienen unidos por enlaces glucosídicos y son más accesibles a los ataques químicos y físicos que la celulosa[80]. Entre las funciones de la hemicelulosa está responder por la absorción de agua y humedad de las fibras celulósicas[81].

Por otro lado, la lignina es un isotrópico de cadena corta y no cristalino, conformado por unidades de fenil – propano[82]. La función de la lignina en las fibras naturales es actuar como un agente ligante en la matriz de la celulosa–hemicelulosa, razón por la cual se encuentra en la lámina media de la fibra y en las paredes de las fibrillas[83]; donde aproximadamente el 25% del total de lignina se encuentra en la lámina media y siendo ésta tan delgada que la concentración de lignina es particularmente alta (~70%)[84]. Debido a que posee compuestos aromáticos, es una sustancia hidrofóbica que elimina agua de las paredes celulares y aporta resistencia mecánica a la fibra, además de hacer resistentes a las células frente a ataques bacterianos.

Con el análisis EDS realizado a las muestras de fibra de fique se comprobó la presencia de elementos como carbono (C) y oxígeno (O) pertenecientes a los componentes orgánicos de la fibra como la celulosa, lignina y hemicelulosa[85]. También se detectaron elementos inorgánicos como calcio (Ca), el cual es fundamental para mantener la turgencia(*) de las células y el transporte de líquidos[86]. Igualmente, se evidenció la presencia de nutrientes típicos en las plantas como

[79] Ibid. p. 2411.
[80] GARCIA VILLAMIZAR. Op. cit., p. 23.
[81] HIGUERA COGUA, Diana Yarith. Evaluación preliminar del comportamiento a tensión de hilos y mallas de fique recubiertos con nano partículas de hierro. Tesis de grado en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2011, p. 22.
[82] GARCIA VILLAMIZAR. Op. cit., p. 24-25.
[83] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411.
[84] Ibid. p. 2411.
[85] GARCIA VILLAMIZAR. Op. cit., p. 44-46.
[86] Ibid., p. 44-46.
(*) Fenómeno que ocurre cuando una célula se hincha debido a la presión ejercida por los fluidos y por el contenido celular sobre las paredes de la célula.

silicio (Si) y aluminio (Al). En la Tabla 3 se presentan los porcentajes de los elementos detectados.

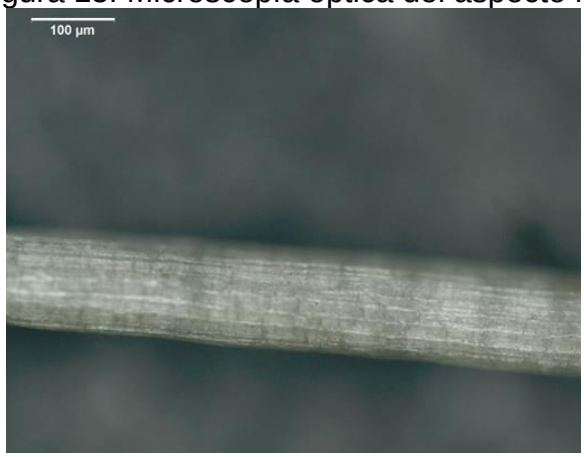
Tabla 3. Porcentajes de elementos hallados en las fibras mediante EDS

Elemento	Peso (%)
CK	62,85
OK	36,38
CaK	0,62
SiK	0,11
AlK	0,04

En lo que refiere a las propiedades físicas, se estudiaron las características morfológicas y dimensionales de la fibra de fique en estado de recepción. Referente a la morfología, longitudinalmente, se observó en el microscopio óptico (Figura 15) que a pesar de ser un producto natural es una fibra de buen aspecto, la cual, para el caso de la investigación, no presentaba deshilado ni grandes daños en la superficie. No obstante, se encontró evidencia de residuos producto del proceso de desfibrado (Figura 15b) y variaciones al azar a lo largo de la longitud de la fibra (Figura 15c y 15d), es decir, no son uniformes; esta falta de uniformidad también fue reportada por Oksman[87]. Así que desde esta perspectiva fue posible determinar que la fibra no es completamente plana, por el contrario, al parecer presenta diversas formas.

[87] OKSMAN. Op. cit., p. 2360.

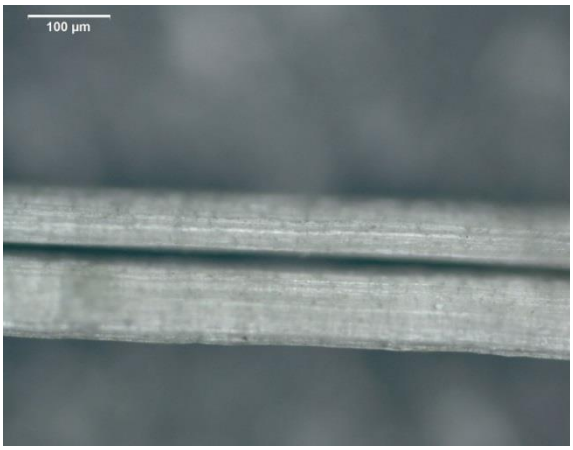
Figura 15. Microscopía óptica del aspecto longitudinal de la fibra de fique



15a. Visualmente en buen estado (100X)



15b. Residuos del desfibrado (100X)



15c. Fibra de fique dividida (100X)



15d. Fibra con hebra deshilada (100X)

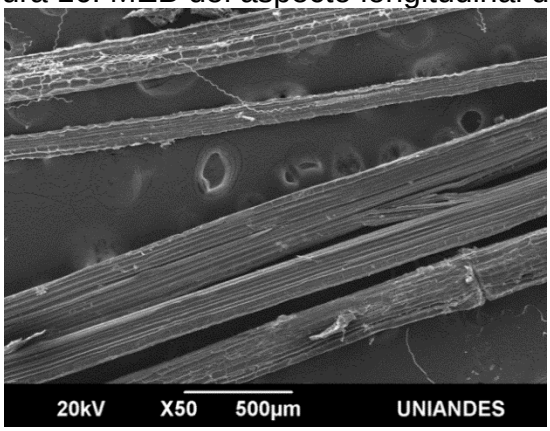
Las características morfológicas halladas con microscopía óptica fueron observadas con mayor detalle y comprobadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). En las imágenes obtenidas (Figura 16) se identificaron, a lo largo de la fibra, los filamentos que la componen (Figura 16a), cavidades superficiales (Figura 16b) y microfibrillas helicoidales (Figura 16c). Respecto a los filamentos, se observa un arreglo longitudinal, cada uno constituido por un gran número de fibrillas elementales soldadas con lignina. Los extremos de las fibrillas se sobreponen para formar filamentos multicelulares a lo largo de la hoja, y son éstos los que conforman

la fibra de fique[88]. Por su parte las microfibrillas helicoidales aportan un carácter elástico a la fibra de fique, gracias a su orientación espiral alrededor de la misma fibra[89]. También se observa que la fibra presenta una superficie rugosa (Figura 16d), asimismo lo reportaron Schellbach et al[90] y Días Toledo Filho[91], además de algunos defectos superficiales los cuales podrían haber ocurrido durante el proceso de extracción según lo indican Satyanarayana et al[92].

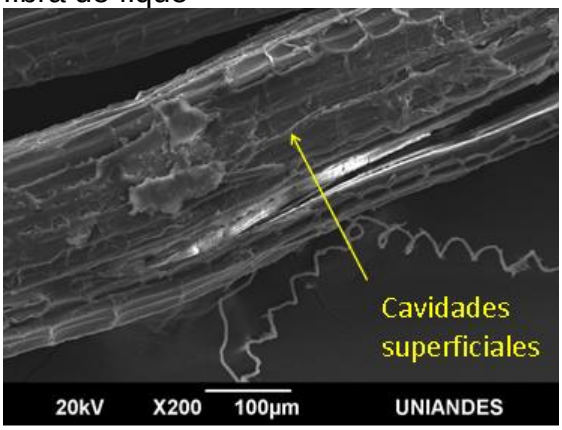
En las distintas micrografías que conforman la Figura 16 se percibe que la superficie externa de la pared celular de la fibra de fique está cubierta por una fina capa de material lignocelulósico y de sustancias cerosas que forman parte de la constitución natural de las fibras uniendo las celdas con sus vecinos adyacentes[93], como es el caso de cualquier fibra natural, asimismo esta capa fue observada por Vilay et al[94] y Gu[95].

[88] MINISTERIO DEL AMBIENTE. Op. cit., p. 26.
[89] HIGUERA COGUA. Op. cit., p. 23.
[90] SCHELLBACH, Sara L.; MONTEIRO, Sergio N.; DRELICH, Jaroslaw W. A novel method for contact angle measurements on natural fiber. Noviembre 10 de 2015. Revista Science Direct. 164, 599-604. (Recuperado el 10 diciembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matlet.
[91] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411.
[92] SATYANARAYANA, Kestur G, et al. Characterization blue agave bagasse fibers of México. Octubre 9 de 2009. Revista Science Direct. Part A, 45, 153-161. (Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.
[93] LI. Op. cit., p. 2038.
[94] VILAY, V.; MARIATTI, M.; MAT TAIB, R.; TODO, Mitsugo. Effect of fiber surface treatment a fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. 2008. Revista Composites Science and Technology, 68, 631-638. (Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.
[95] GU, Huang. Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. 2009. Revista Materials and Design, 30, 3931-3934. (Recuperado el 11 noviembre 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matdes.

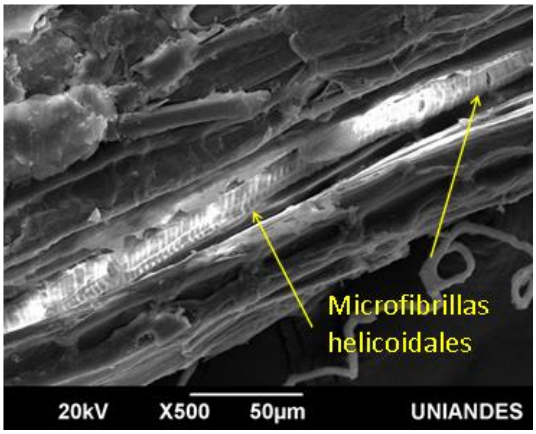
Figura 16. MEB del aspecto longitudinal de la fibra de fique



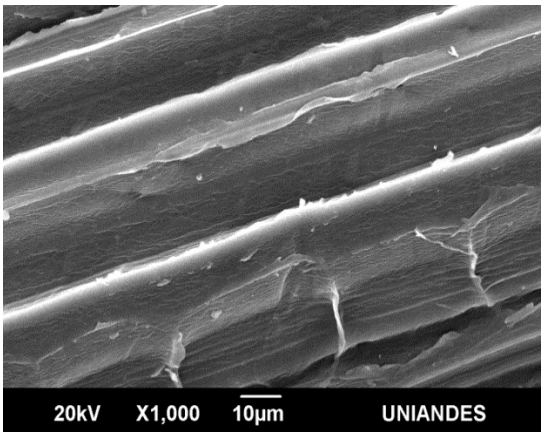
16a. Filamentos de fibra (50X)



16b. Cavidades superficiales (200X)



16c. Microfibrillas helicoidales (500X)



16d. Superficie rugosa de la fibra (1000X)

La observación mediante MOP y MEB de cortes transversales de la fibra de fique mostró que la fibra presenta geometría irregular[96] con diversidad de aspectos y formas geométricas, comprobando lo sugerido en la observación longitudinal de la fibra. En la Figura 17 se observa que en la sección transversal pueden distinguirse dos (2) de las tres (3) formas básicas de la fibra, las cuales se relacionan con igual número de tipos de fibra y que se dan debido a su ubicación en la hoja, éstas formas

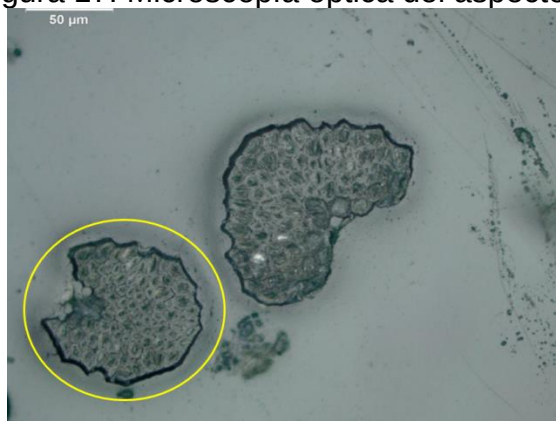
[96] DE ANDRADE SILVA, Flavio, et al. Effect of fiber shape morphology on interfacial bond and cracking behavior of sisal fiber cement based composites. Mayo 10 de 2011. Revista Cement & Concrete Composites. 33, 814-823. (Recuperado el 11 noviembre 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

corresponden a los siguientes: i) estructural, ii) arqueada y iii) del xilema[97]. La fibra estructural se encuentra en la periferia de la hoja de fique, representa la mayoría de las fibras que pueden encontrarse en la planta y es aquella que le proporciona rigidez a la hoja[98]; además son de gran importancia comercial porque casi nunca se rompen durante el proceso de extracción. La sección transversal raramente es circular y usualmente tiene forma de herradura[99] (Figura 17a y 17b). Cabe señalar que en esta investigación se lograron observar algunas fibras de sección transversal circular (Figuras 17c y 17d).

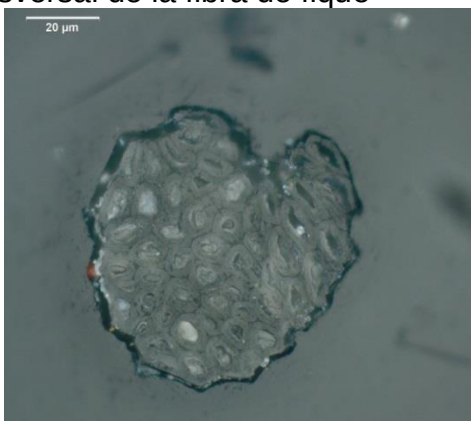
Por su parte, las fibras de forma arqueada se encuentran en asociación con los tejidos conductores de la planta[100] y usualmente en la línea media de la hoja; estas fibras van de la base a la punta de la hoja y tienen buena resistencia mecánica[101] y forma de arco (Figura 17e y 17f). En lo referente a las fibras del xilema, éstas crecen al extremo opuesto de las fibras y se conectan con ellas a través de tejido conductor, están compuestas por celdas de pared delgada las cuales comúnmente se pierden o se dividen durante el proceso de extracción[102], resultando en una fibra con forma arqueada retorcida[103]. Esta última forma no fue posible observarla claramente mediante MOP, sin embargo, fue viable su visualización por medio de MEB (Figura 18a).

[97] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[98] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[99] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[100] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[101] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[102] Ibid., p. 3438.
[103] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 816.

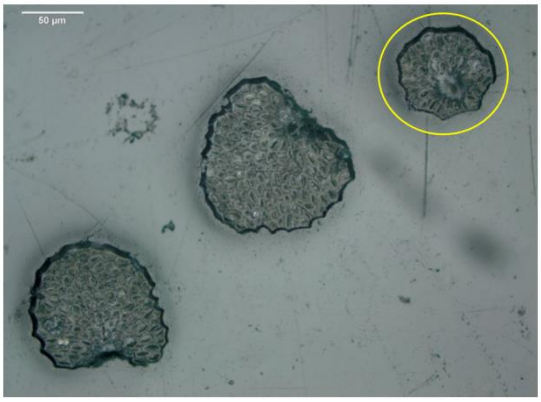
Figura 17. Microscopía óptica del aspecto transversal de la fibra de fique



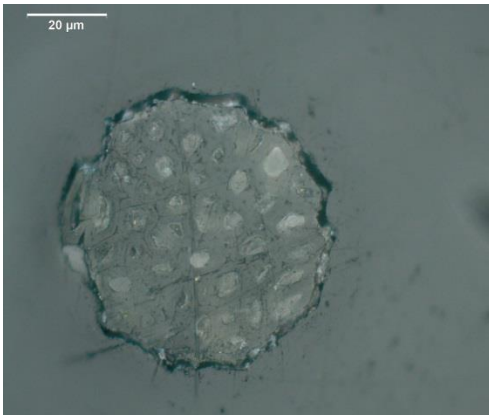
17a. Forma de herradura (200X)



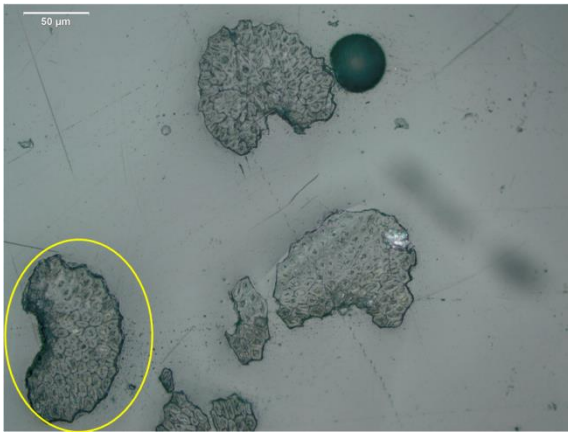
17b. Forma de herradura (500X)



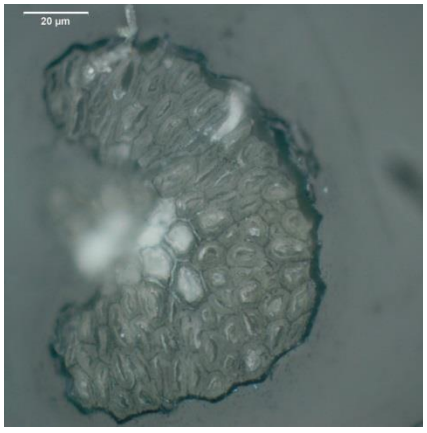
17c. Forma circular (200X)



17d. Forma circular (500X)



17e. Forma arqueada 200X



17f. Forma arqueada 500X

Es interesante anotar que la fibra de fique tiene una estructura jerárquica[104], es decir, técnicamente cada fibra contiene numerosas fibras individuales alargadas o células fibrosas. Estas células fibrosas individuales están unidas entre sí por la lámina media (LM), la cual consiste en hemicelulosa y lignina[105].

Cada célula fibrosa está compuesta por tres (3) partes: pared primaria, pared secundaria y el lumen. En la pared primaria, las fibrillas tienen una estructura reticular y están constituidas, principalmente, por una matriz de microfibrillas de celulosa, hemicelulosa y pectinas[106]. La pared secundaria está constituida por tres capas consecutivas (S_1, S_2 y S_3), donde dentro de cada capa las microfibrillas de celulosa se encuentran paralelas y con alto orden, además tienen arreglo en espiral o helicoidal[107,108]. La capa más interna y delgada es la pared secundaria (S_3), la cual tiene una estructura fibrilar paralela y envolvente que conforma la pared del lumen[109,110,111]. Cada pared consiste en varias capas de estructura fibrilar, conformada por microfibrillas celulósicas, las cuales están embebidas y unidas entre sí por una sustancia intercelular o matriz de inclusión amorfa[112], llamada lámina media, que sirve de unión entre las células individuales y que está compuesta de hemicelulosa, lignina[113,114] y pectina[115]. El proceso de agrupación de las microfibrillas de celulosa en la pared primaria y en las secundarias puede implicar la agregación de microfibrillas celulósicas dispuestas estrechamente, donde a lo largo de la microfibra, las regiones cristalinas se alternen con las amorfas[116]. El

[104] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[105] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[106] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[107] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[108] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 4.
[109] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[110] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[111] HIGUERA COGUA. Op. cit., p. 22.
[112] HINDI, Sherif S. Z. Suitability of Date Palm Leaflets for Sulphated Cellulose Nanocrystals Synthesis. 2017. Revista Nanoscience and Nanotechnology Research. Vol. 4, no. 1, 7-16. (Recuperado el 10 enero 2018). Disponible en: http://pubs.sciepub.com/nnr/4/1/2.
[113] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[114] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[115] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 4.
[116] HINDI. Op. cit., p. 9.

lumen varía en tamaño, pero usualmente está bien definido[117,118], es decir, claramente delimitado; por otra parte, una de las funciones del lumen es responder por la absorción de agua[119].

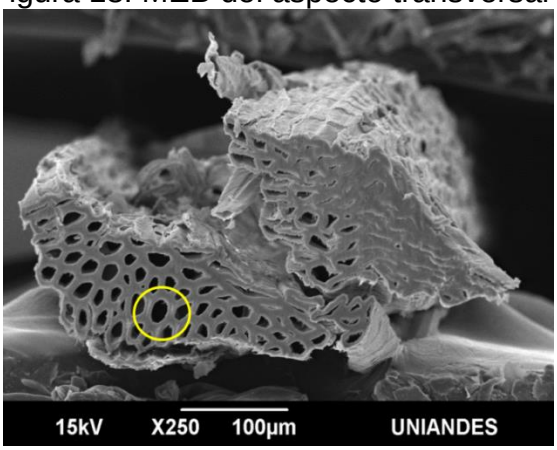
En la Figura 18 se presenta la fibra de fique observada transversalmente en el microscopio electrónico de barrido. Se visualizan la pared celular primaria y secundaria, la lámina media y el lumen poligonal; estructura típica de una fibra natural. Puede verse en la sección transversal que las celdas de la pared están estrechamente empaquetadas y tienen un lumen irregular[120], es decir, no es uniforme en cuanto a la forma, tamaño y cantidad. También se observa que la fibra está compuesta de numerosas fibras elementales, cada una formada por lúmenes poligonales y de paredes secundarias. Además, se confirmó que transversalmente la fibra presenta diversas formas irregulares. Asimismo, como se mencionó en la metodología, se determinó el área transversal, usando el software de procesamiento de imágenes *Image J*, lo anterior fue necesario debido a la irregularidad de la fibra.

Los resultados mostraron que el diámetro promedio de las fibras es alrededor de 81,58±23,12 μm, mientras que, en promedio, el área corresponde a un valor de 5837,88±2099,74 μm^2. Referente al diámetro, Yan[121] y Misnon[122] reportaron que la fibra de sisal se encuentra entre 8–200 μm, Di Bella[123] indicó que se encuentra entre

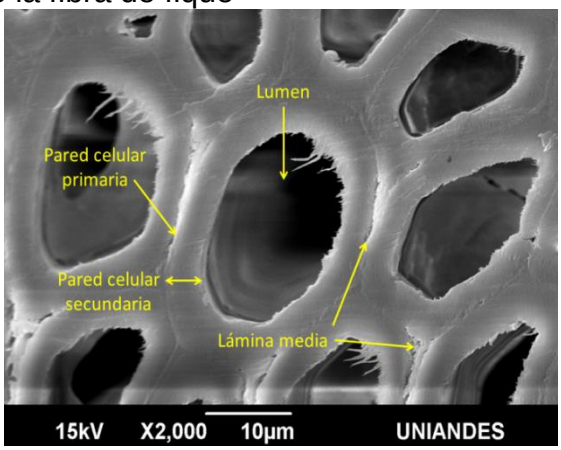
[117] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 2411-2412.
[118] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[119] HIGUERA COGUA. Op. cit., p. 22.
[120] SATYANARAYANA. Op. cit., p. 4.
[121] YAN. Op. cit., p. 97.
[122] MISNON, Mohd Iqbal. Potentiality of utilising natural textile materials engineering composites applications. Marzo 15 de 2014. Revista Materials and Design. 59, 359-368. (Recuperado el 25 junio 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matdes.
[123] DI BELLA, G. Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters. Febrero 8 de 2014. Revista Construction and Building Materials. 58, 159-165. (Recuperado el 25 junio 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

120 y 140 μm, y Lopattananon[124] obtuvo que el diámetro de fibras de hoja de piña es 75±20 μm. Delvasto[125]reporta que el diámetro de la fibra de fique corresponde entre 0,16–0,42 mm, y para Isaza[126] el diámetro y el área de la fibra de fique son respectivamente 200 μm y 14192,75±10093 μm^2; este último, usó el mismo programa de procesamiento de imágenes de esta investigación (*Image J*). Esta gran variabilidad, cuando se trata de determinar el diámetro de fibras naturales, se puede deber al tipo y variedad de la planta, la sección de la hoja a la cual pertenecía la muestra de fibra, el tipo de fibra (es decir, según su ubicación en la hoja) y la metodología usada para medir el diámetro, entre otros.

Figura 18. MEB del aspecto transversal de la fibra de fique



18a. Forma arqueada (250X)



18b. Partes de la fibra de fique (2000X)

El análisis de la sección transversal de la fibra de fique permitió comprender que, las fibras naturales, pese a presentar morfología similar, cuando se comparan difieren una de la otra por factores como: el área interna de los lúmenes, la cantidad de lúmenes, el número y tamaño de las células fibrosas, el espesor de la pared

[124] LOPATTANANON, Natinee. Performance of Pineapple Leaf Fiber–Natural Rubber Composites: The Effect of Fiber Surface Treatments. Marzo 21 de 2006. Revista Performance of palf-nr composites. Vol. 102, 1974-1984. Disponible en: www.interscience.wiley.com.
[125] DELVASTO. Op. cit., p. 188.
[126] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 4.

celular secundaria y la verdadera sección transversal (el área total menos el área de los lúmenes); así también lo reportó Alves[127]. Estos factores vale la pena considerarlos porque permiten vislumbrar que los resultados a tracción obtenidos en esta investigación dependen de las características morfológicas de la fibra de fique y del contenido de celulosa. Lo anterior se debe tener en cuenta cuando se comparen con los resultados de otras investigaciones, como en la fibra de sisal.

1.3.3 Caracterización mecánica de la fibra de fique. Para el cálculo de la resistencia a la tracción se elaboraron probetas conformadas por manojos de 20 fibras, longitud calibrada de 150 mm y velocidad de desplazamiento de 1 mm/min. La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de las fibras con y sin tratamiento fue el promedio de 15 probetas cada una constituida de 20 fibras. El módulo de elasticidad se determinó a partir de la pendiente de la porción lineal de la curva esfuerzo-deformación.

La resistencia a la tracción obtenida, con las condiciones de la investigación, fue de 23,10±7,54 cN/tex (424,27±138,40 MPa) y el módulo de elasticidad fue de 655,06±180,84 cN/tex (24,06±6,64 GPa). Estos resultados concuerdan respectivamente con la resistencia a la tracción y módulo elástico de 24,27±6,25 cN/tex y 680,28±250,2 cN/tex reportados por Isaza[128] en fibra de fique. En contraste, los resultados de esta investigación son superiores a los encontrados por Hidalgo[129], los cuales corresponden a resistencia a la tracción de 225–250 MPa y módulo de elasticidad de 5,7–7,4 GPa en fibra de fique. Asimismo, los resultados de esta

[127] ALVES FIDELIS, Maria Ernestina, et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. Junio 15 de 2013. Revista Journal of materials research and technology. 2, (2), 149-157. (Recuperado el 15 marzo 2014). Disponible en: www.jmrt.com.br.
[128] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 4.
[129] HIDALGO, M.A., MUÑOZ, M.F. Interacción interfacial del compuesto LDPE/Al reforzado con fibra de fique: Influencia de la temperatura. En: X Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Noviembre 2-5, 2010, p. 4.

investigación son similares a los obtenidos por De Andrade Silva[130] y Alves Fidelis[131] en fibras de sisal (resistencia de 400 MPa y módulo elástico de 19 GPa).

Los valores obtenidos de resistencia a la tracción y del módulo de elasticidad se deben, según el análisis químico, a los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina que tiene el fique. Como se mencionó, las microfibrillas de celulosa están rodeadas por los elementos de la matriz (hemicelulosa y lignina), por lo que al aplicar la carga las microfibrillas se alinean con el eje de la fibra, presentándose la falla cuando los elementos de la matriz pierden su vínculo con las fibrillas y los enlaces de hidrógeno en la microfibrilla de celulosa se rompen[132]. Por lo tanto, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y el comportamiento resultante del ensayo muestran que el fique es una fibra de alto desempeño y comportamiento frágil, ya que presenta una resistencia a la tracción mayor a 249 MPa y módulo de Young superior a 19 GPa[133,134]. La resistencia a la tracción puede compararse con fibras de polipropileno, las cuales presentan un rango de resistencia de 400 MPa–550 MPa[135].

Como se ha expuesto en esta disertación, se ha llevado a cabo un número limitado de estudios acerca de las características y del comportamiento a tensión de la fibra de fique, caso contrario ocurre con la fibra de sisal. Por tal razón, las propiedades de la fibra de fique de esta tesis se confrontarán con otras investigaciones realizadas con fique y en sisal, puesto que, estas fibras presentan características similares[136].

[130] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 778.
[131] ALVES FIDELIS. Op. cit., p.150.
[132] YAN. Op. cit., p. 103-104.
[133] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 3.
[134] ALVES FIDELIS. Op. cit., p.153.
[135] Ibid., p. 153.
[136] DELVASTO. Op. cit., p. 188.

La variabilidad en la resistencia a la tracción de la fibra de fique es característica de las fibras naturales. Para De Andrade Silva[137] la variabilidad puede ser explicada principalmente por tres (3) factores: i) parámetros y condiciones del ensayo, ii) características de la planta y iii) medida del área. Los parámetros del ensayo que pueden influenciar los resultados se resumen en: longitud calibrada, razón de deformación, tipo de agarre, resolución de la celda de carga y precisión del actuador[138]. La variabilidad en la resistencia, ocasionada por la longitud calibrada, puede explicarse por la distribución y cantidad de defectos dentro de la fibra o en la superficie de la misma[139]. Asimismo, la longitud calibrada y la velocidad del ensayo tienen efecto sobre las propiedades mecánicas de las fibras celulósicas[140]. En este sentido, Yan[141] indicó que una fibra celulósica tiene más alta resistencia a la tracción si la longitud de la fibra usada durante el ensayo es corta.

Vale mencionar que, además del efecto de la longitud calibrada, el diámetro también afecta la resistencia a la tracción de la fibra[142], así que al aumentar el diámetro de la fibra el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción tienden a disminuir[143]. De igual forma, Oksman[144] reportó que la longitud calibrada tienen efecto sobre la resistencia a la tracción, así: al aumentar la longitud calibrada disminuye la resistencia de las fibras porque el número de defectos se incrementa, además reportó que fibras de sisal tomadas de la raíz y de la parte baja de la planta tienen una resistencia a la tracción y módulo de elasticidad menor, y deformación a la falla más alta; lo anterior es otro factor que influye al momento de determinar las propiedades mecánicas de la fibras naturales, confirmando así, que este tipo de fibras no son uniformes a lo largo de su longitud.

[137] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3341.
[138] ALVES FIDELIS. Op. cit., p.150.
[139] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3341.
[140] YAN. Op. cit., p. 105.
[141] Ibid., p. 153.
[142] YAN. Op. cit., p. 105.
[143] Ibid., p. 105.
[144] OKSMAN. Op. cit., p. 2360.

Lo anterior también fue reportado por Delvasto[145], al indicar que en el fique hay una variación importante en el diámetro de la fibra, hasta del 40%, entre las fibras del mismo lote y a lo largo de la misma, además que esta variación en el diámetro y en sus propiedades mecánicas se debe a la respuesta física, a lo largo de la longitud de la hoja, para soportar su peso, en este sentido la fibra se vuelve más fuerte y rígida hacia la mitad de la hoja y en la punta tienen propiedades moderadas[146].

En resumen, los defectos en la pared celular de la fibra son un factor que determina las propiedades a tracción de la misma; por ejemplo, Yan[147] reportó la presencia de pliegues e indica que limitan la resistencia a la tracción de la fibra. Como se mencionó en la metodología, esta investigación se llevó a cabo con una longitud calibrada constante de 150 mm, lo cual, desde este punto de vista, reduce la posibilidad que la cantidad de enlaces débiles e imperfecciones fuera variable y que resultara en el aumento o disminución de la resistencia a tracción.

Respecto a las características de la planta, el comportamiento mecánico de las fibras depende de: la edad, condiciones del cultivo de la planta en el campo, posible daño al que está sometida la fibra durante el proceso de extracción y la microestructura interna de la fibra[148]. Vale la pena ahondar en este último aspecto, ya que micro-estructuralmente dicha variabilidad puede ser causada por la estructura multi-celular, ángulo microfibrilar, defectos de la fibra, naturaleza visco-elástica y estructura heterogénea (no uniforme), entre otros, por lo que una leve diferencia en la microestructura, asociada a los diferentes tipos de fibra, puede resultar en alguna variabilidad. En este sentido, la variación en el contenido de celulosa de una fibra a la otra puede producir dispersión en las propiedades mecánicas.

[145] DELVASTO. Op. cit., p. 188.
[146] LI. Op. cit., p. 2039.
[147] YAN. Op. cit., p. 105.
[148] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3341.

Referente al último factor, la medición del área, hay diversidad de técnicas usadas en las investigaciones para determinar el diámetro de la fibra, por ejemplo, mediante laser óptico[149], micrómetro y análisis digital de imágenes. En esta investigación se realizó por medio de la última técnica mencionada, pues se consideró el método más preciso para tal efecto en comparación con el micrómetro, el cual, por la forma como se realiza la medición a una fibra o manojo de fibras se convierte en una fuente grande de error por reportar un diámetro mayor al real[150]. La técnica de análisis digital de imágenes para medir el diámetro y estimar el área es particularmente preferible, ya que la sección transversal de la fibra no es perfectamente circular (como se ha tenido en cuenta en algunos reportes de la literatura), es irregular, además de ser variable a lo largo de su longitud. La anterior situación es ocasionada por las diferentes morfologías expuestas previamente, por lo tanto, si se presenta error en la medición del diámetro y estimación del área, conllevará a grandes errores en el cálculo del esfuerzo.

Adicionalmente, la variación del módulo de elasticidad, para una longitud calibrada dada, se debe probablemente a la variabilidad en la microestructura de la fibra y al posible daño que ocurre durante la extracción de la misma[151].

La Figura 19 presenta algunas curvas de esfuerzo (MPa) vs deformación unitaria (mm/mm), mostrando el comportamiento que tuvieron las fibras de fique cuando fueron sometidas a la carga de tracción. En la gráfica se observa que la fibra de fique exhibe un comportamiento frágil con caída de carga repentina, sin embargo, por haber usado manojos de 20 fibras, se observa que posterior a la rotura de una de ellas, las demás fibras continúan soportando la aplicación de la carga hasta que

[149] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3439.
[150] Ibid., p. 3439-3441.
[151] Ibid., p. 3440.

se rompe otra de ellas repentinamente y así sucesivamente hasta que la mayoría de las fibras de la probeta han roto por tracción.

Además, en las Figuras 19a y 19b se observa que las fibras mostraron un comportamiento lineal desde el comienzo de la aplicación del esfuerzo hasta la rotura de las primeras fibras; por otro lado, en las Figuras 19c y 19d se evidencia una región no lineal al inicio de la curva esfuerzo–deformación a niveles de esfuerzo inferiores a 100 MPa. Este comportamiento también fue observado por Alves Fidelis[152], el cual está relacionado con el tamaño y la distribución de las fallas en el volumen de la fibra[153]. Algunas gráficas presentan en su inicio una pendiente distinta, mientras se ajusta la celda de carga o también puede ocurrir debido al colapso de las células débiles de la pared primaria y a la delaminación entre las células de la fibra[154].

Por otra parte, como era de esperarse la fibra de fique presentó un comportamiento visco–elástico cuando es sometido a tensión debido a que tiene componentes cristalinos y no cristalinos, los cuales inducen que el esfuerzo aplicado sea compartido inicialmente entre estas unidades cristalinas y no cristalinas de la fibra natural[155]. Se podría considerar que en este comportamiento visco-elástico, presentado hasta la rotura de la fibra, se manifiesta un alineamiento de las microfibrillas celulósicas con el eje de carga a tracción, presentado un re-ordenamiento de las partes amorfas de la pared, principalmente constituida por pectina y hemicelulosa[156], acompañado por una respuesta elástica ocasionada por el alineamiento de las microfibras. Así mismo, Contreras[157] considera qué debido a

[152] ALVES FIDELIS. Op. cit., p.153.
[153] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3440.
[154] ISAZA RUIZ. Op. cit., p. 3.
[155] MUKHERJEE. Op. cit. p. 3929.
[156] YAN. Op. cit., p. 101.
[157] CONTRERAS, María F.; HORMANZA, Wilson A.; MARAÑON, A. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. Julio 20 de 2009. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1(1), 57-67. (Recuperado el 25 marzo 2015). Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html.

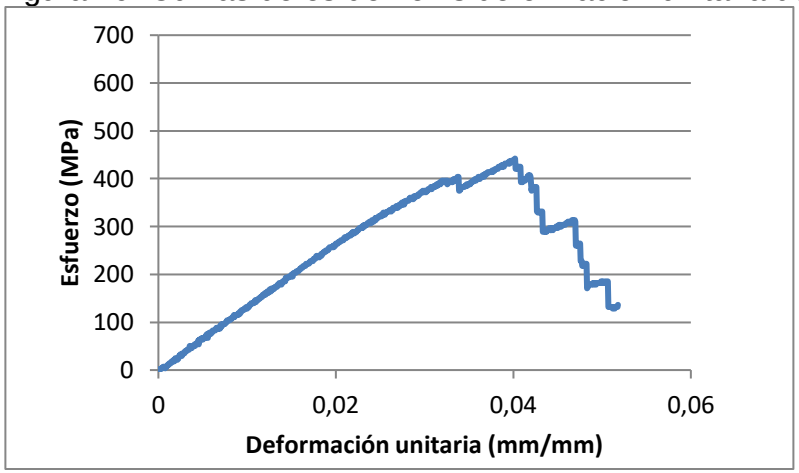
la composición de la fibra de fique, la condición elástica está dada por los tejidos helicoidales que la conforman y que la falla del material ocurre por la fractura de estos tejidos helicoidales y por el desgarramiento de la superficie externa de la pared celular de la fibra, la cual es una capa de material lignocelulósico y de sustancias cerosas. En la Tabla 4 se presenta un resumen de las propiedades de la fibra de fique determinadas en esta investigación.

Finalmente, existe una relación entre el comportamiento mecánico y la composición química de la fibra de fique; es decir, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina afectan las propiedades mecánicas de la fibra. En este sentido, la celulosa es la que más aporta a la resistencia a la tracción y al módulo de elasticidad de la fibra de fique, por otra parte, su efecto sobre la deformación y la ganancia de humedad es mínima[158]. Asimismo, la hemicelulosa contribuye positivamente sobre el módulo de elasticidad y la ganancia de humedad, sin embargo, manifiesta un efecto negativo sobre la resistencia a la tracción y la deformación de la fibra[159]. En cuanto a la lignina, afecta de forma positiva la deformación y la ganancia de humedad, sin embargo, no exhibe el mismo efecto sobre la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de la fibra[160].

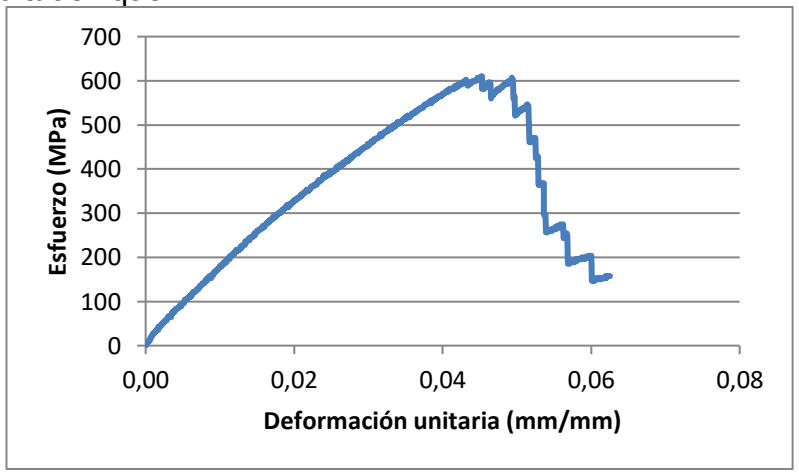
1.3.4 Tratamiento superficial de la fibra de fique. El tratamiento químico superficial aplicado a la fibra de fique se realizó con hidróxido de sodio (NaOH), ácido acético (CH_3COOH) como baño de parada y lavado con agua destilada. En esta investigación se trabajó con bajas concentraciones de ácido y de la base, asimismo con bajos tiempos de exposición de la fibra al tratamiento, lo anterior con el fin de evitar cambios en la cristalinidad de la fibra de fique.

[158] YAN. Op. cit., p. 103-104.
[159] Ibid., p. 103-104.
[160] Ibid., p. 103-104.

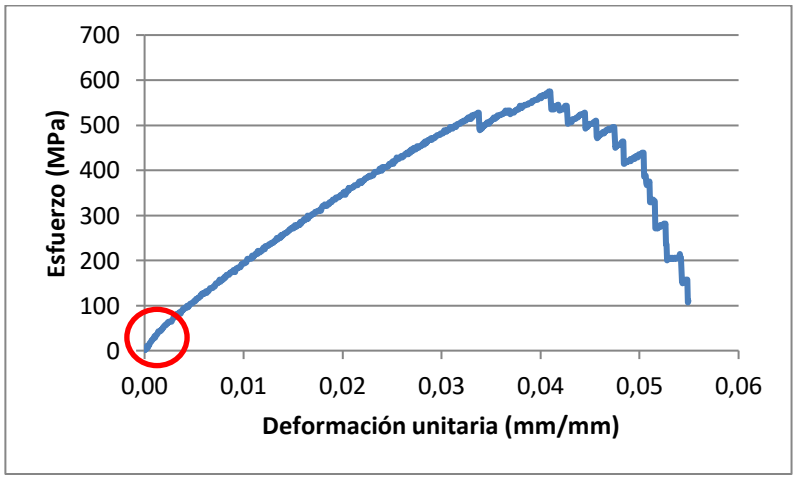
Figura 19. Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria de fibra de fique



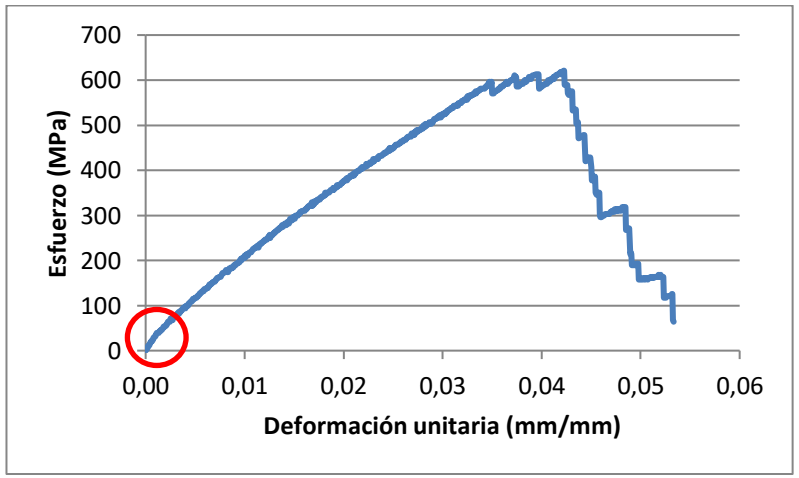
19a. Fibra de fique sin evidencia de colapso



19b. Fibra de fique sin evidencia de colapso



19c. Fibra de fique evidenciando colapso de células fibrosas



19d. Fibra de fique evidenciando colapso de células fibrosas

Tabla 4. Propiedades de la fibra de fique

Parámetro	Resultado
Densidad lineal (tex)	21,44±0,79
Diámetro promedio (μm)	81,58±23,12
Área (μm^2)	5837,88±2099,74
Contenido de humedad (%)	7,71±0,44
Absorción de agua (%)	113,87±15,62
Resistencia a la rotura prom (cN/tex)	23,10±7,54
Resistencia a la rotura prom (MPa)	424,27±138,40
Módulo de elasticidad (cN/tex)	655,06±180,84
Módulo de elasticidad (GPa)	24,06±6,64

En la Figura 20 se muestran algunos ejemplos de los resultados obtenidos con las tirillas de papel de pH para la fibra sin y con tratamiento. Allí se aprecia que la fibra no tratada es ácida, aproximadamente entre 5 y 6 unidades de pH. Lo anterior fue el punto de referencia para la selección del tratamiento. Según el parámetro de control fueron establecidos dos tratamientos, ambos con solución de 3% de NaOH a 5 y 10 minutos de inmersión de la fibra en la solución, baño de parada con 5% de CH_3COOH, es decir, entrada por salida de la fibra y lavado final con abundante agua. Así, con estos procedimientos se logró mantener la acidez de la fibra con un valor de pH aproximado al de la fibra cruda una vez terminó el tratamiento.

Figura 20. pH obtenido para la fibra de fique sin y con tratamiento



Figura 20a. pH de la fibra sin tratamiento

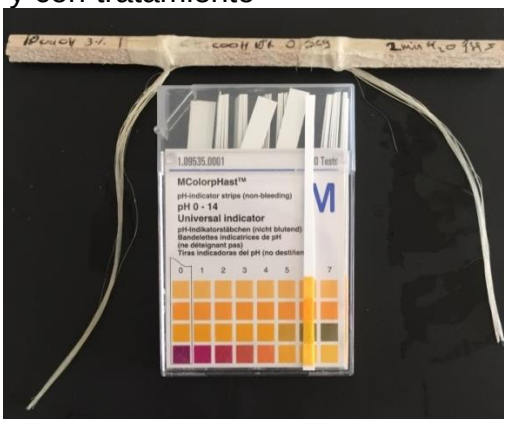
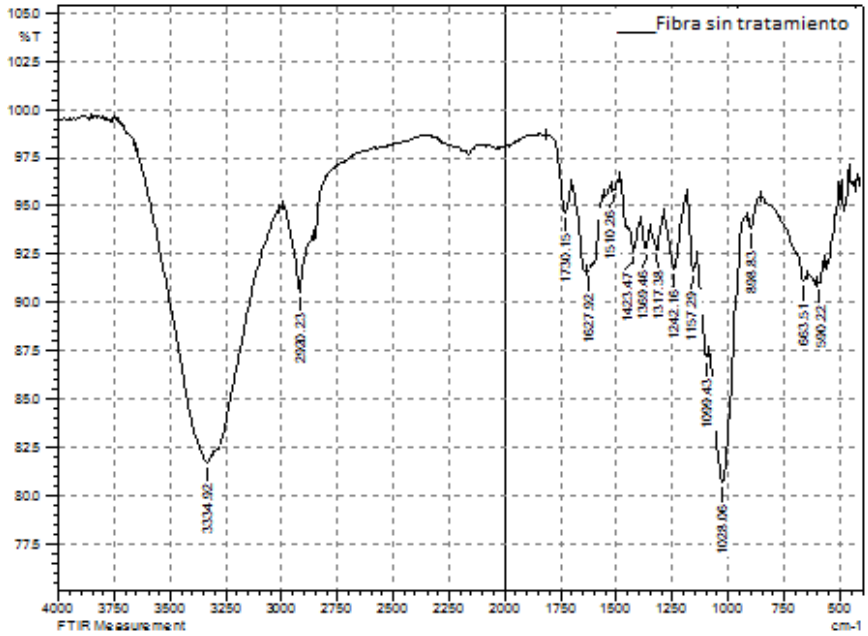


Figura 20b. pH de la fibra con el tratamiento

Posteriormente, muestras de fibra sin y con tratamiento fueron analizadas mediante FTIR. El análisis del efecto que produjo el tratamiento sobre la fibra se realiza por comparación con la fibra no tratada, también, se muestra el resultado producto del tiempo de inmersión de 10 minutos. En la Figura 21 se presenta el espectro para la fibra de fique no tratada. Se observa un gran número de bandas, donde se superponen absorciones características de la celulosa, hemicelulosa y lignina, con preponderancia de las bandas de la celulosa, que es el componente mayoritario de las fibras de fique. Los espectros FTIR de polisacáridos son generalmente difusos, con fuerte solapamiento de las bandas en las regiones de grupos funcionales y de huella dactilar, de modo que las diferencias espectrales entre ellos no se encuentran bien definidas; lo anterior, se atribuye a la complejidad de los diversos tipos de interacciones intermoleculares e intramoleculares[161].

[161] JIMENEZ MUÑOZ, Edit, et al. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. En: revista DYNA. Junio, 2016, vol. 83, no. 187, p. 240.

Figura 21. Espectro FTIR para la fibra de fique sin tratamiento



A pesar de lo expuesto, se lograron identificar absorciones para los tres componentes en estudio (celulosa, hemicelulosa y lignina), en este sentido la absorción mostrada a 3335 cm^{-1} se encuentra de 3700 a 3000 cm^{-1} que es una banda ancha característica de la *celulosa, hemicelulosa y lignina* ocasionada por la tensión de grupos hidroxilo (OH) de estructuras fenólicas sensibles a la formación de puentes de hidrógeno. A 2920 cm^{-1} se encontró la banda provocada por la tensión simétrica del enlace C-H perteneciente a los grupos funcionales CH_2 y CH_3 de la *celulosa*. Garside y Wyeth[162] toman esta banda como una medida del contenido de material orgánico general de la fibra. Una banda típica de los compuestos no celulósicos, *hemicelulosa* y la *lignina* se presentó a 1730 cm^{-1}, la cual se produce por la tensión del grupo carbonilo (C=O) del éster y C=C del grupo aromático, mientras que la absorción a 1628 cm^{-1} corresponde a la flexión del grupo O-H ocasionada por el agua absorbida. Vale la pena aclarar, que para la obtención de los espectros FTIR se tuvo especial cuidado con el proceso de secado, sin

[162] GARSIDE, Paul; WYETH, Paul. Identification of Cellulosic Fibres by FTIR Spectroscopy: Thread and Single Fibre Analysis by Attenuated Total Reflectance. 2003. Revista Studies in Conservation, 48(4), p. 269-275. (Recuperado el 17 octubre 2015). Disponible en: http://www.jstor.org/stable/1506916.

embargo, la absorción de agua en las moléculas de celulosa es inevitable debido a la interacción agua-celulosa[163], lo cual es explicado por Baird et al en su trabajo de análisis computacional sobre moléculas de celulosa[164].

Por otra parte, a 1510 cm^{-1} se alcanzó a detectar una banda que corresponde a la tensión simétrica C=C característica de componentes aromáticos de la *lignina*. La absorción hallada a 1423 cm^{-1} pertenece a la *celulosa* y es producida por la vibración de flexión en el plano del enlace O-C-H o H-C-H. Así mismo las absorciones a 1369 cm^{-1} y 1317 cm^{-1} corresponden a *celulosa* siendo provocadas, la primera, por la flexión en el plano de enlaces C-H, y la segunda, por la vibración de balanceo del grupo funcional CH_2, en cambio, la banda de absorción a 1242 cm^{-1} es un estiramiento del C-O del grupo acetilo perteneciente a la *hemicelulosa*. La absorción a 1157 cm^{-1} corresponde a la tensión asimétrica del C-O-C, la cual surge de los componentes del polisacárido, es decir, de la *celulosa*, igualmente, las bandas a 1099 cm^{-1} y 1028 cm^{-1} pertenecen a la *celulosa* siendo originadas por vibraciones grupales de los enlaces C-C, C-OH y C-H. La absorción a 899 cm^{-1} es la absorción más típica de la configuración estereoquímica Beta (β) de las D-glucopiranosas para la *celulosa*, la cual se considera como una banda débil[165], por último, la banda de absorción a 663 cm^{-1} corresponde a la flexión fuera del plano del enlace C-OH.

El FTIR de la fibra no tratada se tomó como punto de referencia para determinar la efectividad del tratamiento superficial realizado a la fibra. En la Figura 22 se presenta la comparación entre la fibra no tratada y la fibra con tratamiento de 10 minutos en NaOH. Considerando que los grupos OH presentes en las fibras corresponden principalmente a hidroxilos alcohólicos (ácidos débiles), la interacción

[163] MORAN, Juan I., et al. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. Agosto 15 de 2015. Revista INTEMA, 15, p. 149-159. (Recuperado el 15 agosto 2015). Disponible en: https://www.researchgate.net/journal/0969-0239_Cellulose.
[164] Ibid., p. 154-155.
[165] JIMENEZ MUÑOZ. Op. cit. p. 240.

entre el hidróxido de sodio (NaOH) y la fibra natural (fibra-OH) se explica mediante la siguiente reacción[166]:

$$\text{Fibra-OH} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Fibra-O}^{-}\text{Na}^{+} + \text{H}_2\text{O} + \text{impurezas en la superficie}$$

Allí se observa que la banda de absorción ancha entre 3700 y 3000 cm^{-1} se mantiene en la fibra tratada indicando la presencia de *celulosa, hemicelulosa y lignina*. Su mayor intensidad y ancho, respecto a la fibra no tratada, posiblemente sea originado por la formación de nuevos enlaces mediante puentes de hidrógeno entre algunas cadenas de celulosa de la fibra, debido a la disminución o eliminación de hemicelulosa que separa las fibrillas entre sí[167]. Este fenómeno probablemente se produzca porque en la estructura de la celulosa hay tres grupos hidroxilo que están disponibles para la interacción con otros grupos hidroxilo formando enlaces secundarios[168]. Así mismo, las bandas de absorción para la *celulosa* halladas en las regiones de grupos funcionales (2920 cm^{-1}) y de huella dactilar (1423, 1369, 1317, 1157, 1099, 1028 y 899 cm^{-1}) se mantuvieron después del tratamiento, esto muestra que la celulosa resistió la acción del álcali para el tiempo de permanencia de 10 minutos y sin cambios en su cristalinidad, es decir, no se presentó cambio de celulosa tipo I o tipo alfa (α) a tipo II[169]. También se observa que las bandas a 2920 y 1369 cm^{-1} del espectro de la fibra tratada van aumentando en área e intensidad respecto a la fibra sin tratar, esto significa que por causa del tratamiento alcalino la

[166] BARRETO, A. C. H., et al. Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites. Junio 21 de 2011. Revista Science Direct, part A (42), p. 492-500. (Recuperado el 19 junio 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

[167] OBI REDDY, K., et al. Effect alkali treatment on the properties of century fiber. Septiembre 10 de 2013. Revista Journals of Natural Fibers, 10:3, p. 282-296. (Recuperado el 21 diciembre 2014). Disponible en: http://www.tandfonline.com/loi/wjnf20

[168] SIROKY, Jan, et al. Attenuated total reflectance Fourier-transform Infrared spectroscopy analysis of crystallinity changes in lyocell following continuous treatment with sodium hydroxide. Noviembre 18 de 2009. Revista Cellulose, 17, p. 103-115. (Recuperado el 4 marzo 2015). Disponible en: https://www.researchgate.net/journal/1572-882X_Cellulose.

[169] NELSON, Mary L.; O´CONNOR, Robert T. Relation of Certain Infrared Bands to Cellulose Crystallinity and Crystal Lattice Type. Part II. A New Infrared Ratio for Estimation of Crystallinity in Celluloses I and II. En: Journal of Applied Polymer Science. 1964, vol. 8, p. 1335.

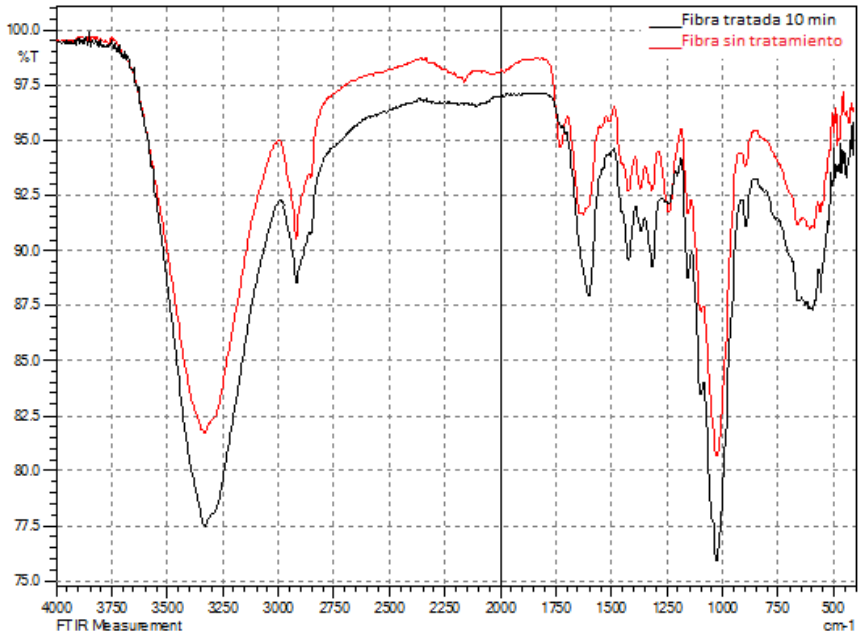
presencia de grupos CH_3 se incrementa debido a la absorción de éstos por parte de la fibra[170].

Por otra parte, se observa que las bandas de absorción a 1730 cm^{-1} y 1242 cm^{-1} pertenecientes a la *hemicelulosa* disminuyeron en la muestra con fibra tratada, de la misma manera ocurrió con las bandas características a 1730 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} que se lograron identificar de la *lignina*. Los resultados obtenidos en el análisis FTIR concuerdan con autores como Sgriccia[171], Yan[172] y Moran[173]. Por consiguiente, con base en lo expuesto, se infiere que el tratamiento alcalino removió parcialmente la hemicelulosa y la lignina presentes en la fibra de fique. Estos resultados apuntan a que el tratamiento produjo un efecto sobre la fibra de fique, el cual, para el caso de la investigación, buscaba la reducción de los compuestos polares (hemicelulosa y lignina) de la fibra que faciliten la absorción de agua y por ende dificulten el proceso de mezclado de la fibra de fique con el concreto. Más aún, Symington[174] y Obi Reddy[175] exponen que la soda cáustica (NaOH) ejerce un efecto mínimo sobre la lignina y sobre la celulosa tipo I de alta resistencia. Por el contrario, debido a la composición de la hemicelulosa, ésta es muy sensible a la solución alcalina y por lo tanto es la más fácil de remover a temperatura ambiente, reaccionando primero al tratamiento con NaOH, además que la eliminación de la hemicelulosa a menudo produce un cambio en la energía superficial de la fibra natural. Por otro lado, debido a la remoción de hemicelulosa amorfa se produce un reordenamiento de las regiones cristalinas, exhibiendo la fibra una mayor naturaleza cristalina[176].

---

[170] SULLCAHUAMÁN, J.A. et al. Op. cit., p. 6.
[171] SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. Characterization of natural fibers surfaces and natural fibers composites. Julio 14 de 2008. Revista Science Direct, part A, 39, p. 1632-1637. (Recuperado el 27 abril 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.
[172] YAN, Haiping, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Junio 10 de 2007. Revista Science Direct, 86, p. 1782-1783. (Recuperado el 29 abril 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.
[173] MORAN. Op. cit., p. 154-155.
[174] SYMINGTON, Mark C.; BANKS, W. M.; OPUKURO, David West. Tensile Testing of Cellulose Based Natural for Structural Composite Aplications. En: Journal of Composite Materials. 2009, vol. 43, no. 9, p. 1096.
[175] OBI REDDY. Op. cit., p. 289.
[176] Ibid., p. 291.

Figura 22. Comparación de espectros FTIR de la fibra tratada y sin tratamiento



Con el fin de comprobar los hallazgos resultantes del análisis mediante FTIR, la fibra tratada también fue examinada mediante MOP. En la Figura 23 se compara entre fibra sin y con tratamiento; allí se observa en la fibra sin tratar la presencia de impurezas en su superficie que pueden influenciar la adhesión con la matriz cementicia, una vez se fabrique el material compuesto. Se observa, también, qué al aumentar el tiempo de tratamiento de la fibra, ésta presentó una superficie más uniforme y limpia de grasas y ceras, además se advierte la estructura fibrilar de la fibra, siendo más evidente en la fibra que estuvo sumergida durante 10 minutos en el NaOH.

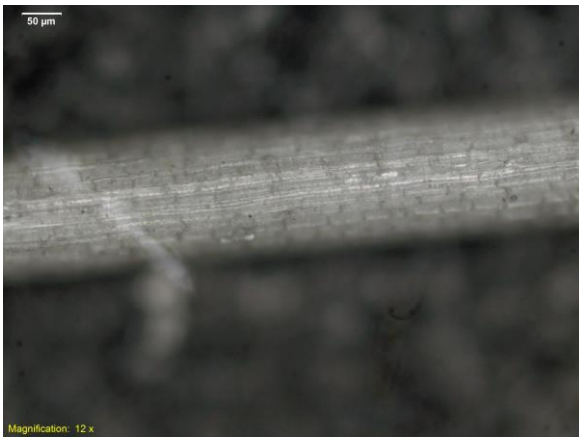
Figura 23. Microscopia óptica de fibra sin y con tratamiento en NaOH



23a. Fibra sin tratamiento (120X)



23b. Fibra con tratamiento de 5 minutos (120X)



23c. Fibra con tratamiento de 10 minutos (120X)

Los resultados hallados con MOP se confirmaron con MEB. En la Figura 24 se muestran micrografías obtenidas mediante MEB de la fibra con tratamiento de 5 y 10 minutos; en ellas se observa la estructura característica de la fibra con un ligero cambio en la morfología superficial de la misma, aunque la estructura macro aún se conserva respecto a la fibra sin tratamiento mostrada en la Figura 16. Es decir, al comparar la fibra sin y con tratamiento alcalino, se revelaron cambios superficiales a causa de la remoción parcial de componentes interfibrilares amorfos de menor

peso molecular que la celulosa (hemicelulosa y lignina), cera, grasas e impurezas, resultando en la formación de una superficie más rugosa[177]. Según Troedec et al[178], este tratamiento químico elimina los extractos solubles en el álcali, ceras y aceites de la superficie de la fibra y por lo tanto aumenta la rugosidad general de la superficie. Resultados semejantes a los presentados fueron reportados por Moran[179], Park[180] y por Sgriccia[181]. Estas observaciones son evidencia de una condición superficial más limpia después del tratamiento alcalino y que para el caso de la investigación fue mejor para el tiempo de 10 minutos en la solución alcalina. Según Zhou[182] estos cambios tienen beneficios en la fabricación de materiales compuestos cuando las fibras se utilizan como agentes reforzantes ya que la superficie más rugosa de la fibra mejora la adhesión mecánica entre la matriz y el material de refuerzo, en este caso la fibra de fique.

Otro aspecto importante está relacionado con los defectos inherentes a la naturaleza de la fibra y a su procesamiento, los cuales fueron mostrados en las Figuras 15 y 16. Para el desarrollo de la investigación fue un factor relevante que las condiciones de tiempo, temperatura y concentración del álcali y del ácido no provocaran en las fibras imperfecciones adicionales a las inherentes ni fibrilación. En este sentido, Symington[183] aborda el tema al comparar la fibra sin tratamiento con la fibra tratada; según sus condiciones, en la fibra con tratamiento se observaron en la superficie más imperfecciones y grietas, a pesar de afirmar que estas imperfecciones podrían haber estado previamente en las fibras y no ser causadas por la remoción parcial de la materia superficial, no obstante, el tratamiento las hizo

[177] HERRERA FRANCO, P. J.; VALADEZ GONZALEZ, A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. Junio 22 de 2005. Revista Science Direct, part B, 36, p. 597-608. (Recuperado el 14 mayo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.
[178] TROEDEC, M., et al. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. En: Composites Part A. 2008, vol. 39, no. 3, p. 514-522.
[179] MORAN. Op. cit., p. 154-156.
[180] PARK, Sunkyu, et al. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulose performance. En: Biotechnology for Biofuels. Marzo, 2010, vol. 3, p. 1-10.
[181] SGRICCIA. Op. cit., p. 1635.
[182] ZHOU. Op. cit., p. 807.
[183] SYMINGTON. Op. cit., p. 1097.

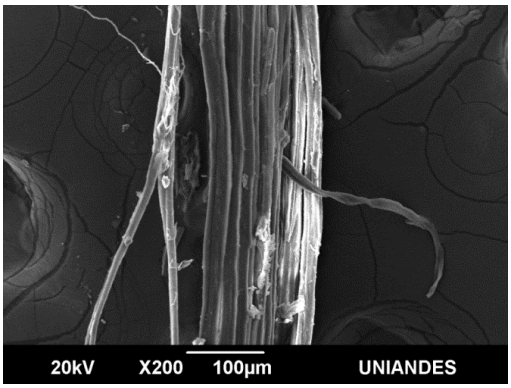
más aparentes o visibles. También indica que se pueden presentar imperfecciones adicionales como resultado de la manipulación durante el procesamiento o por sobre tratamiento. Respecto a la fibrilación, Cao[184] explica que ocurre por causa de las condiciones del tratamiento (tiempo, concentración y temperatura) especialmente con NaOH y que consiste en que las fibras se dividen una vez se aplica el tratamiento, es decir, se rompe el haz de microfibrillas por disolución de la hemicelulosa cuando el NaOH reacciona con los grupos hidroxilo provocando la destrucción de la estructura celular. También Obi Reddy[185] indica que debido a la fibrilación la fibra tiene un aspecto más poroso.

En la Tabla 5 se presenta la comparación de algunas propiedades de la fibra que fueron estudiadas después del tratamiento con la soda cáustica. Como se explicó en la metodología, se determinaron nuevamente la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la absorción de agua.

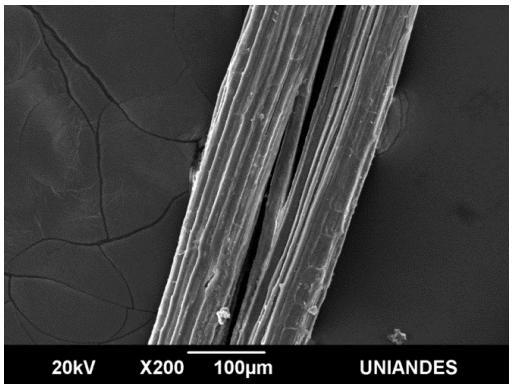
En primer lugar, se observa que la resistencia a la tracción incrementó su valor a medida que aumentó el tiempo de permanencia de la fibra en la solución alcalina. Sin embargo, con base en el diagrama de barras de la Figura 25 se observa que estadísticamente no hubo diferencia significativa entre la fibra con tratamiento y la no tratada. La razón de que no haya significancia entre estos valores se atribuye al corto tiempo que estuvo la fibra sumergida en la solución alcalina de NaOH.

[184] CAO. Op. cit. p. 426.
[185] OBI REDDY. Op. cit., p. 288.

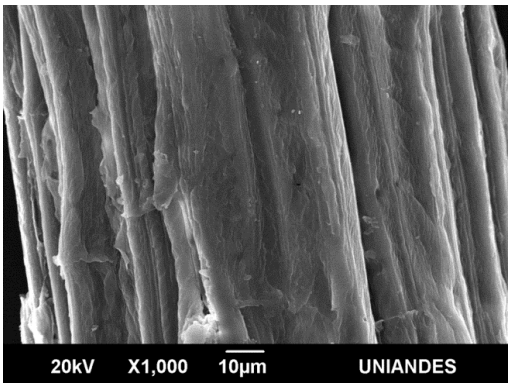
Figura 24. Microfotografías en MEB de la fibra de fique tratada con NaOH por 5 y 10 minutos



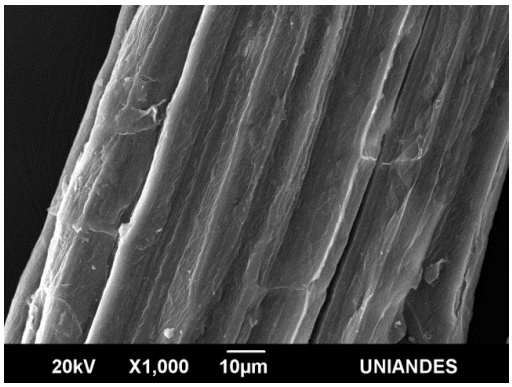
24a. Fibra con tratamiento de 5 minutos (200X)



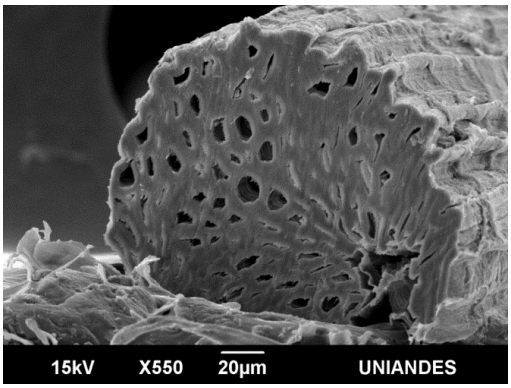
24b. Fibra con tratamiento de 10 minutos (200X)



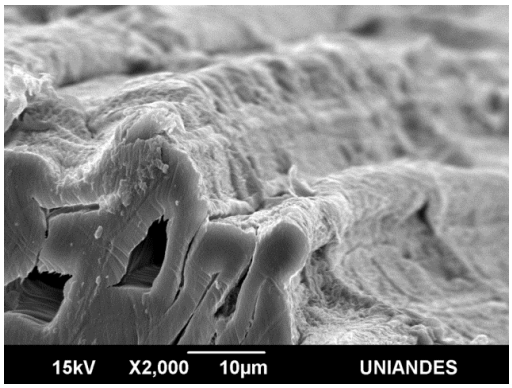
24c. Fibra con tratamiento de 5 minutos (1000X)



24d. Fibra con tratamiento de 10 minutos (1000X)



24e. Fibra con tratamiento de 5 minutos (1000X)

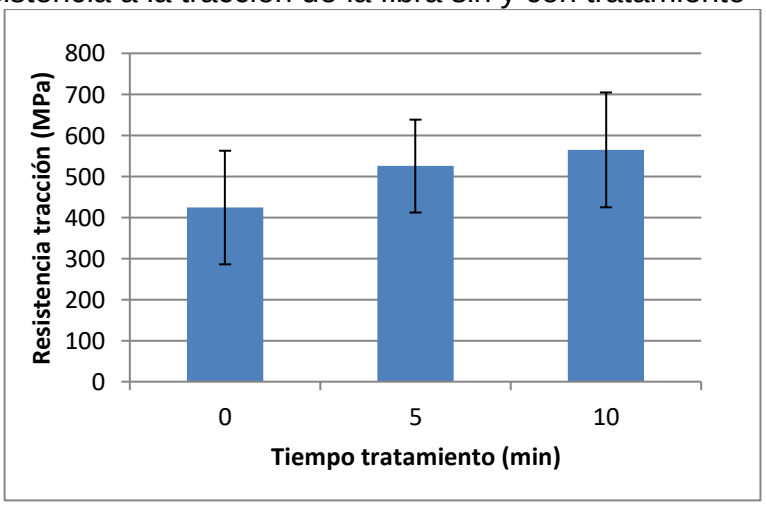


24f. Fibra con tratamiento de 5 minutos (1000X)

Tabla 5. Comparación de propiedades de la fibra con y sin tratamiento

Parámetro	Fibra de fique sin tratamiento (0 minutos)	Fibra de fique con tratamiento de 5 min. en NaOH	Fibra de fique con tratamiento de 10 min. en NaOH
Resistencia a la rotura prom. (cN/tex)	23,10±7,54	28,60±6,16	30,75±7,62
Módulo de elasticidad (cN/tex)	655,06±180,84	556,39±100,50	569,94±132,60
Absorción de agua (%)	113,87±15,62	108,36±15,41	87,94±2,11
Resistencia a la rotura prom (MPa)	424,27±138,40	525,25±113,19	564,73±139,90
Módulo de elasticidad (GPa)	24,06±6,64	20,44±3,69	20,94±4,87

Figura 25. Resistencia a la tracción de la fibra sin y con tratamiento



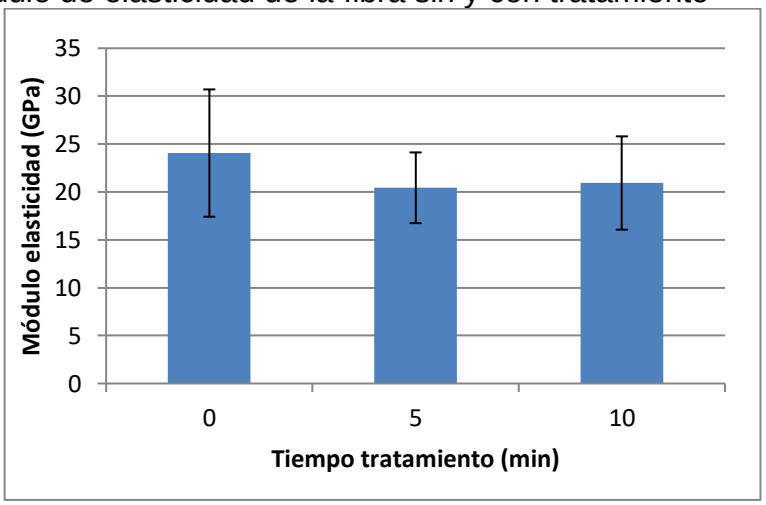
No obstante, aunque la diferencia no sea significativa, con base en los análisis FTIR y de MEB, la razón del incremento de la resistencia a la tracción, después del tratamiento alcalino, es la remoción parcial de la hemicelulosa, lignina y de otras impurezas no celulósicas, las cuales permanecen distribuidas en la región

interfibrilar de la fibra. Lo anterior también fue reportado por Yan[186], indicando que la hemicelulosa y la lignina tienen una correlación negativa con la resistencia a la tracción, por lo tanto, cuando la cantidad de estos compuestos disminuye en la fibra la resistencia a la tracción aumenta. Este comportamiento se da porque cuando los compuestos amorfos (hemicelulosa y lignina) son removidos, la región interfibrilar permite que las fibrillas de celulosa al interior de la pared celular tengan mayor capacidad de reorganizarse a lo largo de la dirección de la carga de tracción[187], es decir, la celulosa alfa (α) muestra una mayor alineación de la estructura cristalina con el tratamiento. Estos reordenamientos de las fibrillas resultan en una mejor capacidad de carga, mejorando la resistencia a la tracción de las fibras tratadas con el álcali. Así también lo reportaron Prasad Kundu[188] y Symington[189] en sus investigaciones. A su vez, al disminuir la cantidad de hemicelulosa y lignina, la fibra tendrá mayor abundancia de celulosa con relación a los componentes amorfos, lo cual produce un aumento en su cristalinidad después del tratamiento.

Con relación al módulo de elasticidad, en la Tabla 5 y en la Figura 26 se muestra que el módulo disminuyó cuando se aplicó el tratamiento con la soda cáustica, pero al igual que lo ocurrido con la resistencia a la tracción, no hubo diferencia significativa en esta propiedad entre la fibra sin y con tratamiento superficial. Este comportamiento se dio porque se ocasionó una remoción parcial y no total de hemicelulosa y cera de la superficie de la fibra y de las regiones interfibrilares. Esta situación se produce porque estos dos componentes tienen una correlación positiva con el módulo[190], es decir, al disminuir el contenido de estos compuestos en la fibra disminuye a su vez el módulo de elasticidad.

[186] YAN. Op. cit., p. 103-104.
[187] LOPATTANANON. Op. cit., p. 1981
[188] PRASAD KUNDU, Sarada, et al. Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties. Septiembre 27 de 2012. Revista Construction and Bulding Materials, 37 p. 844-846. (Recuperado el 15 septiembre 1016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.
[189] SYMINGTON. Op. cit., p. 1097.
[190] YAN. Op. cit., p. 104-105.

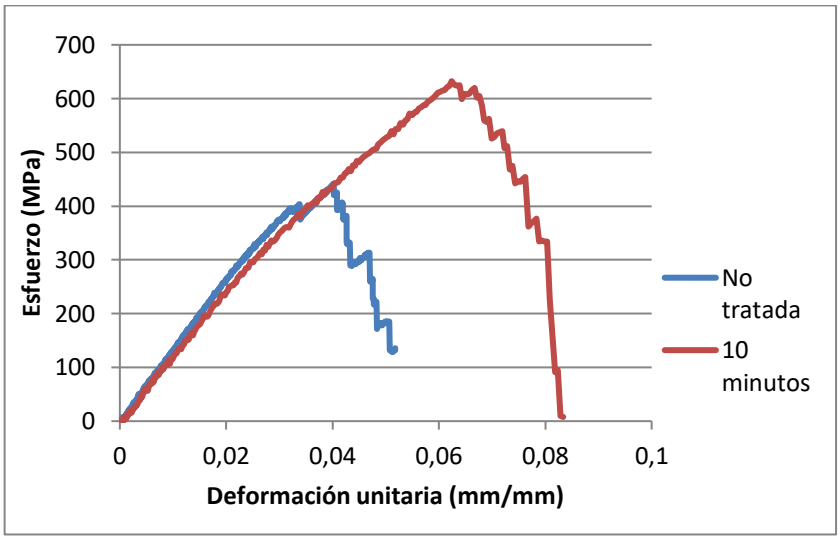
Figura 26. Módulo de elasticidad de la fibra sin y con tratamiento



Como se expuso previamente, no se presenta cambio significativo en la cristalinidad, es decir, no hubo alteración de celulosa α a celulosa tipo II, sin embargo, cualquier tratamiento alcalino produce una ligera mejora en la cristalinidad de la fibra, causada por la remoción de los constituyentes ligantes (hemicelulosa y lignina) lo que produce una leve variación en la disposición de la cadena de celulosa originando un reordenamiento de las moléculas celulósicas. Este fenómeno produce aumento en la tracción y disminuye el módulo de elasticidad[191] lo que se puede apreciar en la Figura 27. Allí se compara entre una fibra no tratada y otra sometida al tratamiento alcalino durante 10 minutos. Las dos curvas presentan un comportamiento similar, en donde la fibra exhibe un comportamiento frágil con caída de carga repentina cuando se produce el fallo de la fibra, exhibiendo la rotura de cada una de las fibras que conformaban la probeta.

[191] RONG, Min Zhi, et al. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. Marzo 13 de 2001. Revista Composites Science and Technology, 61, p. 1439-1440. (Recuperado el 25 de septiembre de 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compscitech.

Figura 27. Comparación de la curva esfuerzo vs deformación para fibra sin y con tratamiento alcalino



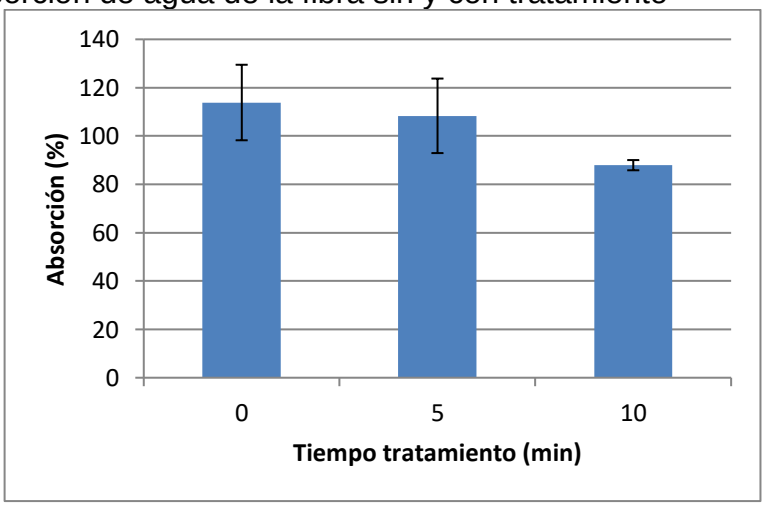
También se determinó la absorción de agua de la fibra de fique, después de realizado el tratamiento químico, con el fin de establecer si ésta presentaba algún cambio en su carácter hidrofílico, ya que los grupos hidroxilo, los cuales existen en toda la estructura de las fibras naturales, hacen que sean hidrofílicas[192]. Por consiguiente, conocer el cambio en su carácter hidrofílico permitiría estimar si la fibra de fique tratada afectaría o no la manejabilidad de la mezcla de concreto reforzado. La descripción del ensayo de absorción se presentó en la sección 1.2.3 de la metodología.

En el gráfico de columnas de la Figura 28 se observa que la absorción de humedad en la fibra tratada disminuyó respecto a la fibra sin tratamiento. Además, se determinó que entre el tratamiento de 5 minutos y la fibra no tratada no hubo diferencia estadística significativa. La fibra sumergida durante 10 minutos presentó diferencia significativa con relación a las otras dos condiciones de la fibra. Esta disminución en la absorción de agua se debe a la remoción parcial de hemicelulosa y lignina, puesto que estos componentes de carácter amorfo presentan una

[192] LI. Op. cit., p. 2041.

correlación positiva con esta propiedad[193], en otras palabras, si disminuye la cantidad de hemicelulosa y lignina de la fibra, la ganancia de humedad disminuye. La lignina es el componente que tiene la menor absorción de agua, mientras que la hemicelulosa es la responsable de este fenómeno en la fibra. Lo anterior ocurre porque la hemicelulosa tiene una estructura abierta que contiene muchos grupos hidroxilo[194] y al aumentar la sustitución del grupo OH por el grupo CH_3CO la polaridad de la fibra disminuye, provocando que la fibra absorba menor humedad por la disminución de los grupos polares (grupo OH principalmente)[195]. Otros autores como Prasad Kundu[196], Symington[197] y Obi Reddy[198] han reportado resultados similares.

Figura 28. Absorción de agua de la fibra sin y con tratamiento



La densidad lineal no se determinó después del tratamiento con la solución de NaOH ya que según Ray[199], en la fibra se producen cambios significativos en la

[193] YAN. Op. cit., p. 103-104.
[194] XUE. Op. cit., p. 26.
[195] SULLCAHUAMÁN, J.A., et al. Op. cit., p. 6.
[196] PRASAD KUNDU. Op. cit., p. 844.
[197] SYMINGTON. Op. cit., p. 1097.
[198] OBI REDDY. Op. cit., p. 289.
[199] RAY. Op. cit., p. 1013.

densidad cuando ésta ha sido sometida a una solución al 5% de NaOH por al menos 2 horas de tratamiento continuo.

Por último, con base en el análisis de los espectros infrarrojos, la observación morfológica y la caracterización física y mecánica, se determinó que la fibra de fique con tratamiento en solución alcalina a temperatura ambiente, concentración de 3% de NaOH y tiempo de inmersión de 10 minutos presentó la mejor opción junto al fique no tratado para ser usadas como la fibra de refuerzo en la siguiente etapa de la investigación y que se expondrá en el siguiente capítulo.

1.4 CONCLUSIONES

Con base en los resultados y el análisis realizado en esta parte de la investigación, se concluye lo siguiente:

El jugo de fique es una sustancia de carácter ácido con presencia de saponinas, que actúan como agentes surfactantes y tensoactivos con la capacidad de producir espuma. Como esta propiedad es la que se desea aprovechar en esta investigación, con base en los resultados de formación de espuma y pH se estableció un tiempo de fermentación del jugo de fique de 24 horas después de su extracción para ser usado como aditivo en las mezclas de concreto. Además, se determinó que el 92,82% del jugo de fique corresponde a agua.

La fibra de fique es básicamente un material compuesto de fibra reforzada a micro-escala, constituido por microfibrillas de celulosa como elementos reforzantes y rodeadas por hemicelulosa, lignina, ceras y grasas. Es una fibra que en estado de recepción tiene aproximadamente 7,71±0,44% de humedad en su estructura y es capaz de absorber hasta 113,87% de agua, además tiene una densidad lineal de 21,44 tex, un diámetro aparente de 81,58 μm y un área bruta aproximada de 5837,88 μm^2.

La variedad de fique usada en la investigación denominada *Fique Cenizo* presentó resistencia a la tracción de 23,10±7,54 cN/tex (424,27±138,40 MPa) y módulo de elasticidad de 655,06 cN/tex (24,06 MPa). Estos valores se deben al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de la fibra, mostrando que es una fibra natural de alto desempeño.

Morfológicamente la fibra de fique usada en la investigación presentó buen aspecto sin grandes daños en su superficie por causa del proceso de extracción y manejo posterior. Además, superficialmente es rugosa y presentó variaciones morfológicas en su longitud mostrando tres formas geométricas transversales básicas que se relacionan con la ubicación de la fibra en la hoja, a saber: estructural con forma de herradura, arqueada con forma de arco y del xilema con forma arqueada retorcida. Con base en los resultados obtenidos, se espera que la rugosidad y las distintas formas de la fibra de fique contribuyan al proceso de anclaje de la fibra con la matriz de concreto.

El comportamiento mecánico de la fibra de fique corresponde a un comportamiento visco–elástico cuando es sometido a tensión debido a que tiene componentes cristalinos y no cristalinos, los cuales inducen que el esfuerzo aplicado sea compartido inicialmente entre unidades cristalinas y no cristalinas de la fibra natural.

La alta dispersión de la fibra de fique en las propiedades estudiadas en esta investigación, probablemente se deba a distintos factores como son: composición química, técnicas de medición, condiciones experimentales, características de la planta, del cultivo y del proceso de extracción tales como: edad de la planta, tipo de suelo, condiciones del cultivo y ubicación de la fibra en la hoja de la planta.

Los espectros FTIR realizados a la fibra sin y con tratamiento, presentaron fuerte solapamiento de las bandas, de modo que las diferencias espectrales entre distintas

especies no se encontraron bien definidas. Sin embargo, se lograron identificar las señales propias que están presentes en la lignina, la hemicelulosa y la celulosa.

Con base en los resultados físico-mecánicos y de FTIR se infiere que las condiciones determinadas del tratamiento alcalino (concentración, tiempo de permanencia y temperatura) produjeron modificaciones químicas y morfológicas en la fibra de fique, resultando un tratamiento efectivo para la remoción parcial de hemicelulosa, lignina y probablemente ceras y grasas presentes en la superficie de la fibra, además no se produjo deslignificación de la fibra natural que implicara en una fibra débil. Para el caso de esta investigación, el tratamiento con los mejores resultados se obtuvo al aplicar de NaOH al 3% por 10 minutos, baño de parada con 5% de CH_3COOH y lavado final con abundante agua destilada, por último, secado al aire durante 72 horas.

Las condiciones de mercerización escogidas en este trabajo de investigación causaron la remoción parcial de los componentes amorfos (hemicelulosa y lignina), lo que produjo un incremento en la rugosidad de la superficie de la fibra, en la resistencia a la tracción y probablemente en la cristalinidad de la misma. Por el contrario, provocó la disminución del módulo de elasticidad y de absorción de agua de la fibra. Se espera que esta nueva condición superficial y estas propiedades físicas y mecánicas logradas mejoren el anclaje mecánico de la fibra de fique en la matriz de concreto, con miras a mejorar algunas propiedades mecánicas del material compuesto de matriz cementicia.

2. COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO DE UN CONCRETO MODIFICADO CON FIBRA Y JUGO DE FIQUE

2.1 INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad existen los materiales de construcción reforzados con fibras naturales, sin embargo, el concepto de refuerzo en materiales con base cementicia se desarrolló en la década de los 70's, al proponerse sustituir las fibras sintéticas o de asbesto por las fibras de productos vegetales[200]. El uso de fibras naturales o de celulosa presenta una serie de ventajas frente a las sintéticas, como: disponibilidad, costo relativamente bajo, capacidad de reciclado, biodegradabilidad, naturaleza no peligrosa, huella de carbono cero, son renovables, rigidez y resistencia equilibrada de manera adecuada, además, se pueden encontrar en una amplia variedad de formas y morfologías, además de considerarse sostenibles[201].

Teniendo en cuenta las características de las fibras vegetales mencionadas en el capítulo anterior, se han realizado investigaciones, en al menos 40 países[202], concernientes a su uso como refuerzo de matrices cementicias base cemento Portland, demostrando su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del mortero y del concreto, entre ellas: aporte de tenacidad a flexión, incremento de la resistencia a la tracción directa y al impacto, mejorada retracción por secado, comportamiento optimizado después del agrietamiento, entre otros; no obstante, las fibras tienen la desventaja de presentar degradación en ambientes alcalinos o por ataque biológico[203]. Cabe señalar que gran parte de la información publicada tiende

[200] TONOLI, G. H.D., et al. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. Octubre 26 de 2010. Revista Cement & Concrete Composites, 33, p. 225-232. (Recuperado el 25 marzo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

[201] ARDANUY, Monica; CLARAMUNT, Josep; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Enero 22 de 2015. Revista Construction and Building Materials, 79, p. 115-128. (Recuperado el 8 agosto 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

[202] JUAREZ ALVARADO, Cesar A.; RODRIGUEZ LOPEZ, Patricia. Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. En: Revista Ingenierías, enero-marzo, 2004, vol VII, no 22, p. 8.

[203] TARA SEN. Op. cit., p. 187.

a tratar con altas concentraciones de fibra en volumen, sin embargo, por razones económicas, la tendencia actual en la práctica es minimizar el volumen de fibra.

La fibra de fique, disponible en Santander–Colombia, es apropiada para aplicaciones constructivas cuando es incorporada en una matriz cementicia y que puede ser usada como fibra corta distribuida aleatoriamente (Tonoli[204]), como fibras orientadas a lo largo de su longitud o como fibra tejida[205]. Los compuestos de matriz cementicia reforzados con fibra vegetal constituyen una alternativa de material para construcción no convencional y tradicional[206]. El uso del fique como refuerzo del concreto representa un desafío para la industria de la construcción en Colombia, ya que es una forma de refuerzo económica y disponible, que requiere bajo grado de industrialización y de consumo de energía para su procesamiento, en comparación con fibras de refuerzo sintéticas que son más comunes[207].

Por otra parte, el uso de aditivos (naturales o industriales) ha sido un componente vital en la industria de la construcción, obteniendo concretos más trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad[208]. En este sentido, vale la pena resaltar el potencial uso de jugo de fique como aditivo en las mezclas de concreto. Este subproducto es empleado como abono dentro del mismo cultivo y en la mayoría de los casos es arrojado de manera indiscriminada a los suelos y fuentes de agua, convirtiéndose en un problema ambiental por contaminar las fuentes de agua cercanas a los sitios de producción debido a la lenta biodegradación asociada a los altos contenidos de saponinas y fenoles[209]. Se conoce que el jugo de fique es un subproducto conformado principalmente por agua, celulosa, minerales y materia orgánica, esta última, a la vez está constituida por sacarosa, proteínas y saponinas.

[204] TONOLI. Op. cit., p. 225
[205] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 3438.
[206] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 246.
[207] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 777.
[208] RAMÍREZ ARELLANES, S., et al. Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis micro estructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. En: Materiales de Construcción. Julio-septiembre, 2012, vol. 62, no. 307, p. 328.
[209] JARAMILLO, Op. Cit., p. 16.

Dicha composición es la base para que en algunas investigaciones se haya propuesto al jugo de fique para la producción de agentes tensoactivos[210]. Dentro de dichos estudios, el jugo de fique se tiene en cuenta como un potencial aditivo para mezclas de mortero y concreto que actúe como surfactante reduciendo la tensión superficial del agua en la mezcla[211]. Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada para esta tesis doctoral, solo un aproximado del 28% involucran el uso del jugo de fique como aditivo natural en mezclas cementicias, esto en relación con investigaciones que implican el uso de fibra de fique como refuerzo en concreto o mortero, denotando así un desconocimiento del jugo de fique a nivel internacional.

En este apartado de la disertación doctoral, los objetivos alcanzados fueron 3. El primero se orientó a establecer el efecto de la fibra con y sin tratamiento superficial sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto convencional teniendo en cuenta la adherencia fibra-concreto; el segundo consistió en establecer el efecto del empleo de jugo de fique sobre las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto en estudio, atendiendo a su capacidad como aditivo inclusor de aire; el tercer objetivo se enfocó en determinar la mezcla de concreto más adecuada que pudiera ser manejada con la fibra con y sin tratamiento superficial, y el jugo de fique atendiendo a sus características físicas.

Este capítulo aborda varios aspectos relacionados con la adición de fibra y jugo de fique en una mezcla de concreto de cemento Portland, de uso general, con relación agua/material cementante (a/c) de 0,5. Se reemplazó el agregado fino, en este caso arena silícea, por fibra de fique al 0,5%, 0,75% y 1,0%, se usó longitud de fibra de 10 mm, 20 mm y 30 mm, y se adicionó jugo al 1,0%, 2,0% y 3,0% en masa de cemento. En total se fabricaron y evaluaron 21 mezclas de concreto para el desarrollo de la investigación. Para todas las dosificaciones se determinaron sus propiedades en estado fresco y endurecido. Con relación al estado fresco, las

[210] Ibid., p. 14.
[211] Ibid., p. 9.

pruebas realizadas fueron: asentamiento, pH y masa unitaria (densidad), las cuales fueron relacionadas con las propiedades en estado endurecido de resistencia a la compresión, tracción indirecta, flexión, porosidad y densidad seca global (Dsg).

Las propiedades determinadas fueron enlazadas con la observación en MOP y de la microestructura mediante MEB, además, se analizó su composición elemental con EDS y se estudiaron las fases cristalinas con DRX. Para el análisis, también se usaron estadística inferencial y análisis digital de imágenes, estableciendo los efectos de la fibra y del jugo de fique sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Con base en los resultados se determinaron las dosificaciones de fibra y jugo más adecuadas, las cuales fueron combinadas y que conformaron, al final, una mezcla que contó con un conjunto de propiedades físicas y mecánicas equilibradas. Por último, esta dosificación fue estudiada adicionando la fibra de fique con el tratamiento alcalino que se estableció en el capítulo 1.

2.2 METODOLOGÍA

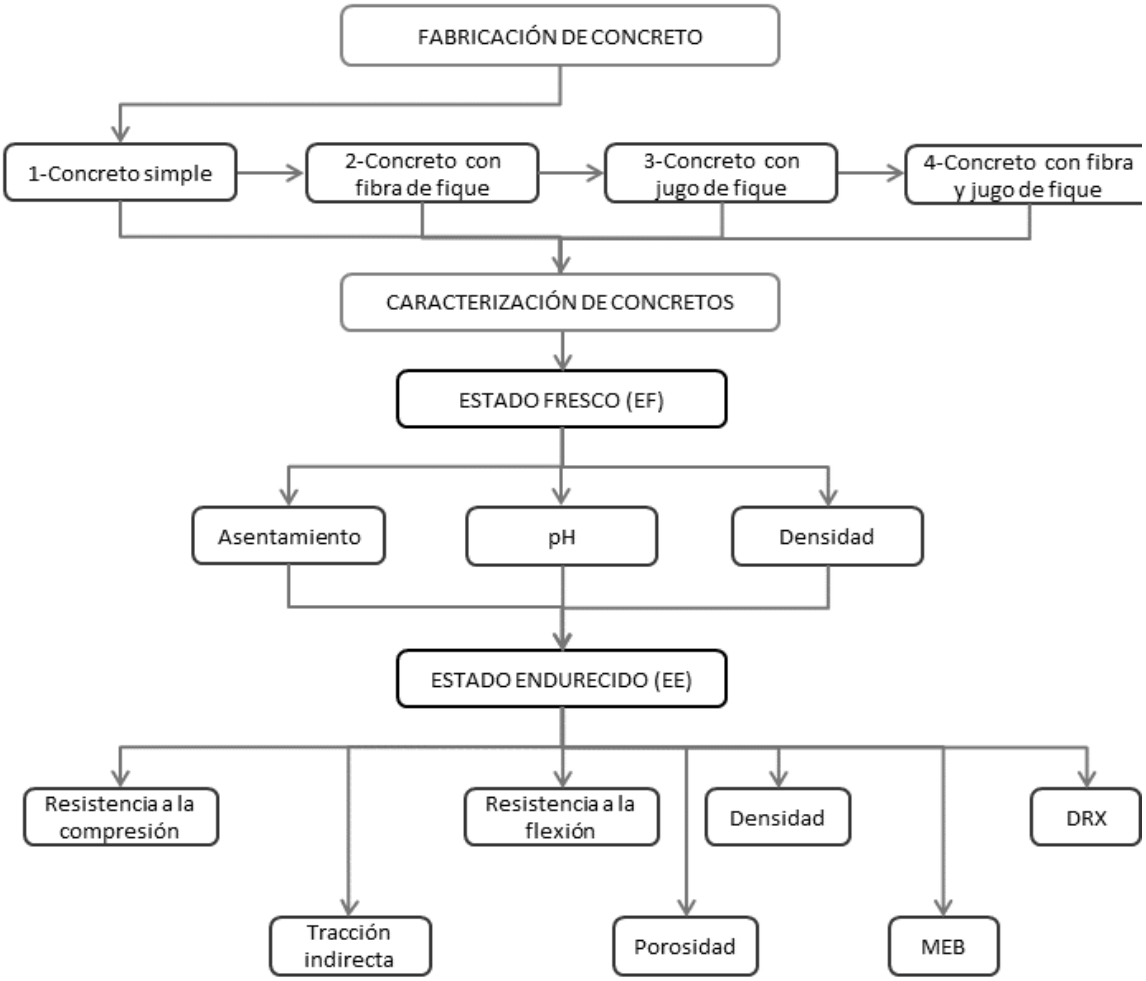
En esta parte de la investigación se fabricó y caracterizó el concreto en estado fresco y endurecido; para esto se trabajó con cuatro tipos de mezcla de manera secuencial. En la Figura 29 se presenta el diagrama de las actividades ejecutadas, para luego exponer cada una de ellas más detalladamente.

2.2.1 Fabricación de concreto. En primer lugar, se caracterizó el material constituyente del concreto, posteriormente con base en estos resultados se elaboró el diseño de mezcla siguiendo el método ACI 211[212], el cual se concibió con una resistencia de diseño de 25 MPa con relación agua/material cementante (a/c) igual a 0,5 (de aquí en adelante relación a/c); tamaño máximo nominal del agregado grueso de 19 mm y módulo de finura del agregado fino (arena silícea) de 3,0.

[212] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. United States.: ACI, 2002. p. 1-38. ACI 211.

El material cementante usado fue cemento Portland de uso general (UG). En esta investigación se usó el mismo tipo de cemento, agregado grueso y fino, para que no fueran variables de estudio.

Figura 29. Diagrama del proceso metodológico para la caracterización del concreto



La evaluación de las propiedades mecánicas se realizó sobre cilindros y viguetas, los primeros para los ensayos de resistencia a la compresión y tracción indirecta, y las viguetas se usaron para el ensayo de flexión con 4 apoyos. Por otra parte, con el fin de conseguir una mezcla homogénea y dimensiones uniformes en las muestras, se usaron una mezcladora eléctrica de tambor giratorio e inclinable,

moldes cilíndricos de polipropileno de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto, con volumen aproximado de 1647 cm^3 y con entrada neumática para desencofrado en la base, y para las viguetas se usaron moldes en madera de 100 mm de alto por 100 mm de ancho por 350 mm de largo, con volumen 3500 cm^3. Los moldes usados y la elaboración de las probetas, por el método de compactación manual, cumplieron con las normas ASTM C192[213] referente a la fabricación y curado de especímenes de concreto y ASTM C1018[214] que corresponde al ensayo de resistencia a la flexión de concreto reforzado con fibra. Referente al mezclado de la fibra con los constituyentes del concreto, se realizó siguiendo el procedimiento planteado por Días Toledo Filho[215], el cual indica que la fibra se agrega en la mezcladora como si fuera un ingrediente adicional de la mezcla cementicia; además, como la mezcla debe tener una dispersión uniforme de las fibras, se tuvo la precaución de evitar la formación de bolas de fibra, las cuales se producen principalmente durante el proceso de adición de la fibra a la mezcla[216].

Con el fin de cumplir con la norma ASTM C192, una vez fueron fabricadas las muestras cilíndricas y las viguetas, se desencofraron 24 horas después y se sumergieron en una pileta con agua para su proceso de curado en húmedo hasta el momento del ensayo. Con este curado se evita la pérdida de humedad y se controla la temperatura del concreto hasta que alcance la resistencia deseada[217]. La caracterización de los materiales y la fabricación de las probetas de concreto se llevaron a cabo en el Laboratorio de Caracterización de Materiales, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

---

[213] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. p. 1-8. ASTM C192.

[214] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. p. 1-8. ASTM C1018.

[215] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 248.

[216] FOUAD WAFA, Faisal. Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete. En: Eng. Sci., 1990, vol. 2, p. 50.

[217] HERNANDEZ VICENTE, Rene. Uso de fibras de bagazo de caña en concreto. Tratamiento de las fibras con parafina. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Veracruz: Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil, 2008, p. 84.

En primer lugar, se elaboró y ensayó el *concreto simple*, luego el *concreto con fibra de fique*, posteriormente el *concreto con jugo de fique* y una vez se determinaron las mezclas con fibra y jugo de fique con los resultados más favorables, según los parámetros de la investigación, se procedió a fabricar y caracterizar la mezcla que contenía a la vez *concreto, fibra y jugo de fique*. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para la adición de fibra fueron la cantidad y la longitud, es decir, se trabajó con 3 cantidades diferentes de fique en la mezcla: 0,5%, 0,75% y 1,0% de masa de fibra en reemplazo de agregado fino, y con 3 longitudes distintas: 10 mm, 20mm y 30 mm. Lo anterior resultó en una matriz experimental de 3x3, es decir, cada porcentaje de adición de fibra se acompañó con cada longitud. En cuanto al concreto con aditivo natural se elaboraron tres (3) mezclas con porcentaje de jugo de fique de 1,0%, 2,0% y 3,0% en masa de cemento. Además, para tener un punto de comparación con los resultados del concreto con jugo de fique, se fabricó una mezcla de concreto con aditivo comercial plastificante e inclusor de aire al 0,5% de masa de cemento, según la recomendación del fabricante. La comparación con el aditivo comercial obedeció a las saponinas que contiene el jugo y que actúan como surfactantes que generan burbujas en la mezcla de concreto en estado fresco; efecto igual al que tendría un aditivo plastificante e inclusor de aire como el usado en la investigación.

Teniendo en cuenta los resultados de las mezclas señaladas, se fabricaron distintos concretos que contenían fibra y jugo de fique en la misma mixtura. Así mismo, se elaboró con fines de comparación un concreto con fibra y aditivo comercial. Una vez se obtuvo la mezcla de concreto con los resultados más adecuados, se fabricaron los 2 concretos finales con la fibra tratada superficialmente. En total se fabricaron y evaluaron 21 mezclas de concreto para el desarrollo de la investigación. En el Anexo A se presentan las dosificaciones con las adiciones de fibra y jugo de fique.

2.2.2 Caracterización de concreto en estado fresco. A cada uno de los concretos fabricados se le realizaron las siguientes pruebas: asentamiento, pH y masa unitaria (densidad).

Con el fin de conocer el cambio que se presentaba en cada mezcla de concreto, debido a la adición de la fibra y del jugo de fique, se llevó a cabo la prueba de asentamiento, según la norma ASTM C143[218] y la determinación de masa unitaria, bajo la norma ASTM C138[219]. Ambas pruebas se ejecutaron en el momento en que se fabricaron los diferentes concretos. Además, a fin de establecer el cambio de pH por efecto del uso de los aditivos natural y comercial en la mezcla de concreto, se ejecutó el ensayo de medición de pH, con base en la norma internacional ASTM E70, introduciendo en la mezcla recién batida papel de pH y el electrodo del equipo *sensION+pH1*, el mismo instrumento usado para determinar la acidez del jugo de fique. En el Anexo B se presenta el consolidado de la cantidad de muestras ensayadas en el estado fresco según el tipo de concreto.

2.2.3 Caracterización de concreto en estado endurecido. Con el objeto de evaluar el efecto que produjo la adición de jugo de fique y la presencia de fibra con y sin tratamiento superficial, como refuerzo de la matriz cementicia, se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, resistencia a la flexión, densidad y porosidad, MEB y difracción de rayos X (DRX). Las muestras fueron evaluadas en las edades de 3, 7 y 28 días de curado, excepto los ensayos de difracción de rayos X y la observación en el microscopio electrónico. A continuación, se explica cada una de las pruebas realizadas:

[218] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocke United States.: ASTM, 2012. p. 1-4. ASTM C143.
[219] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2014. p. 1-4. ASTM C138.

El ensayo de resistencia a la compresión se hizo siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C39[220], en una máquina universal de ensayos marca AMSLER con capacidad de carga de 5 a 200 toneladas. Para la ejecución de la prueba, en primer lugar, se nivelaban las caras de las probetas con un par de platos retenedores con neopreno, a fin de eliminar cualquier irregularidad y garantizar caras planas paralelas; posteriormente las muestras eran colocadas en la máquina asegurando la alineación de sus ejes con la placa de carga, la cual se bajaba hasta tener contacto con el cilindro de concreto y por último se aplicaba una carga constante y continua hasta la falla. Enseguida, en la misma máquina universal se realizaba la prueba de tracción indirecta, en este caso se cambiaba la posición de la probeta según los parámetros de la norma ASTM C496[221], aplicando la carga hasta la rotura. Para cada una de las pruebas de compresión y tracción indirecta fueron ensayadas 189 probetas. En el anexo B se discrimina la cantidad de probetas ensayadas según el tipo de concreto.

La prueba de resistencia a la flexión del concreto se llevó a cabo sobre una viga simplemente apoyada y con dos cargas aplicadas en los tercios de la luz (Figura 30), respaldado por las normas ASTM C78[222] y ASTM C1018. Se utilizó la norma ASTM C78 porque esta configuración permite que la parte del espécimen entre las dos cargas se someta a un esfuerzo constante de flexión pura y los puntos de la aplicación de carga se mantengan alejados del punto de ruptura de la pieza, obteniendo resultados más fiables[223]. En contraste, con la configuración de 3 puntos, el único punto sometido a flexión pura es el que se encuentra justo debajo de la aplicación de carga, lo cual genera un aplastamiento en la superficie del

[220] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken United States.: ASTM, 2014. p. 1-7. ASTM C39.
[221] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken United States.: ASTM, 2011. p. 1-5. ASTM C496.
[222] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken United States.: ASTM, 2009. p. 1-4. ASTM C78.
[223] ARDANUY. Op. cit., p. 120.

espécimen cerca o en la sección transversal de ruptura, enmascarando los resultados de las pruebas de flexión, según fue reportado por Ardanuy[224].

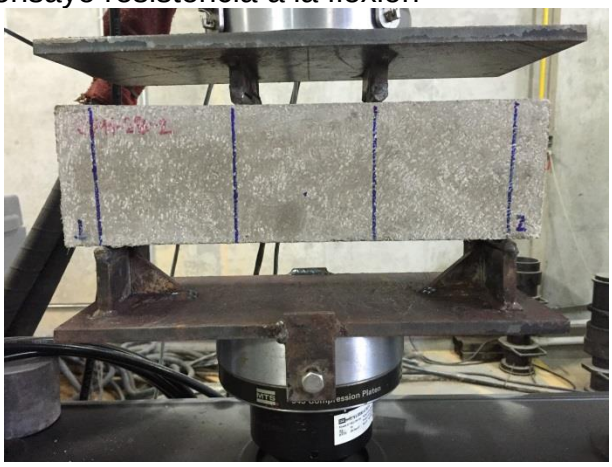
La prueba se realizó con la máquina universal de ensayos MTS con celda de carga de 25 KN y actuador de 100 KN, la misma máquina usada para caracterizar la fibra de fique. Para el ensayo, en primer lugar, se marcaron sobre las caras superior e inferior y sobre las caras laterales de las viguetas los puntos de apoyo, ubicados a 25 mm de cada extremo, y los puntos de aplicación de la carga en los tercios medios de la misma. Después se ubicó la probeta sobre una placa plana y firme con los respectivos apoyos, la cual estaba sujeta a la máquina de ensayos; posteriormente, se ajustó el sistema y se aplicó la carga a una velocidad de deformación 0,05mm/s (3 mm/min) hasta la rotura de la vigueta. Otros autores como De Andrade Silva[225] y Ali[226] han usado respectivamente velocidades de 0,5 mm/min y 5 mm/min. De igual forma que lo reportado por Ali[227], los resultados en esta investigación se expresan según la norma aplicada como módulo de rotura (MOR). Para la prueba de flexión se ensayaron 189 probetas. En el Anexo B se discrimina la cantidad ensayada para cada tipo de concreto.

Por otra parte, según Ardanuy[228], un factor importante es la relación entre la distancia máxima entre apoyos y el espesor de la muestra, el cual debe ser superior a 20, ya que, al disminuir, aumenta el mecanismo de compresión en la transmisión de la carga a los soportes distorsionando los resultados. En esta investigación se usó una relación de 30, con lo que se aseguró la no distorsión de resultados por este factor en el ensayo de flexión. En las 3 pruebas ejecutadas (compresión,

[224] Ibid. p. 120.
[225] DE ANDRADE SILVA, Flavio; MOBASHER, Barzin; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. Julio 30 de 2009. Revista Cement & Concrete Composites, 31, p. 724. (Recuperado el 30 mayo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
[226] ALI, Majid, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. Enero 21 de 2012. Revista Construction and Building Materials, 30, p. 815. (Recuperado el 30 mayo 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.
[227] Ibid. p. 817.
[228] ARDANUY. Op. cit., p. 120.

tracción indirecta y flexión) el valor registrado fue el de la carga de agrietamiento, que corresponde a la fuerza ejercida sobre el concreto y parte de las fibras una vez se producía la primera grieta[229]. Adicionalmente, durante el ensayo de flexión, posterior a la primera fisuración, la prueba se extendía hasta lograr la apertura total de la grieta, esto se llevó a cabo por 2 razones: i) observar el efecto de la fibra sobre el material fibro-reforzado y ii) obtener los datos necesarios para calcular la energía absorbida por el material; este cálculo se hizo usando el software de cómputo numérico MATLAB.

Figura 30. Montaje ensayo resistencia a la flexión



La prueba de densidad seca global y volumen de poros permeables se realizó siguiendo la norma ASTM C642[230]; de esta manera, los especímenes cilíndricos se cortaron en porciones individuales de 1±0,30 kg libres de grietas, fisuras visibles y bordes rotos. Posterior al corte, las muestras se secaron en la estufa de secado marca *Memmert* a 105°C, donde se mantuvieron durante 48 horas hasta obtener masa constante, para luego ser removidas de la estufa y puestas a enfiar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente; se les determinó la masa, usando una balanza analítica marca *Shimadzu UW8200S* con capacidad máxima

[229] ALI. Op. cit., p. 817.
[230] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. p. 1-3. ASTM C642.

de 8200 g y precisión de 1,0 g. Fueron sumergidos los especímenes en agua durante 24 horas hasta obtener masa constante, pasado este tiempo y condición, las muestras fueron retiradas del agua y con una toalla se removió la humedad superficial, las probetas se dejaron en condición saturada superficialmente seca (SSS) y a continuación se midió su masa. Posteriormente, se colocaron las muestras en un recipiente con agua que las cubriera y se hirvieron durante 5 horas, pasado este tiempo se enfriaron al aire por pérdida natural de calor durante 18 horas, después se removió la humedad superficial con una toalla y se determinó su masa. Por último, los especímenes se introdujeron dentro de un tanque con agua, suspendiéndolos dentro de una canastilla que cuelga de un alambre, para después proceder a medir su masa sumergida. Con los datos recogidos se calculó la densidad seca global y el volumen de poros permeables, ecuaciones (2) y (3) respectivamente. Para la prueba de densidad seca global y volumen de poros permeables fueron ensayadas 252 probetas. En el Anexo B se discrimina la cantidad ensayada para cada tipo de concreto.

La estimación del volumen de poros permeables fue importante para la investigación, específicamente para las mezclas de concreto con fibra de fique, porque es una medida que permite determinar si los cambios producidos en las propiedades mecánicas se da por la acción de la fibra en el material compuesto endurecido o por la generación de más porosidades durante la fabricación; lo anterior, causado por cambios en la manejabilidad de la mezcla debido a la inclusión de fibra en la matriz cementicia. Además, la propiedad física en cuestión fue fundamental porque permitió conocer el estado del concreto antes de ser sometido a un ambiente agresivo, cuestión que será abordada en el capítulo 3 de esta tesis.

$$Dsg = \left[\frac{Ps}{(Psss - Pm)}\right] * \rho \qquad \textit{Ecuación (2)}$$

$$PA\ (\%) = \left[\frac{(Psss - Ps)}{(Psss - Pm)}\right] * 1000 \qquad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

Ps: Masa de la muestra seca al horno, al aire, [kg]

Psss: Masa de la muestra en estado SSS después de inmersión y ebullición, [kg]

Pm: Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, [kg]

ρ: Densidad del agua, [1000 kg/m^3]

Dsg: Densidad seca global (o bruta), [kg/m^3]

PA: Volumen de vacíos (espacio de poros permeables), [%]

Para verificar los resultados derivados del cálculo de volumen de poros permeables y de conocer la porosidad total (porosidad cerrada y abierta), se llevó a cabo una prueba alternativa con tinta negra y óxido de zinc (ZnO); este proceso se muestra en la Figura 31. El procedimiento consistió en tomar las muestras cilíndricas que se usaron para las mediciones de porosidad volumétrica y extraer de allí una muestra de sección cuadrada. Posteriormente, se sometieron a un proceso de desbaste usando lijas de agua número 80, 240, 320, 400 y 600, con el fin de obtener una superficie lisa y libre de impurezas (Figura 31a) que permitiera la aplicación de la tinta y el ZnO; luego se secaron en la estufa de secado marca *Memmert* a 105°C, donde se mantuvieron durante 48 horas, para después ser puestas a enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente y en seguida aplicar la tinta (Figura 31b). Una vez aplicada la tinta negra, las muestras se llevaron nuevamente en la estufa durante 24 horas, a fin de secar la tinta. A continuación, se retiraron y se dejaron enfriar; en seguida se aplicó en exceso el ZnO (Figura 31c), para luego ser retirado con una espátula y trapo ligeramente húmedo. Obtenidas las muestras con tinta y ZnO (Figura 31d), se fotografío las superficies preparadas y se analizaron en el

software de procesamiento de imágenes *Image J*. El tratamiento de imágenes se realizó con una resolución de 1716 pixeles y consistió en calcular la fracción de área (%) de la porosidad de las muestras. Un procedimiento similar usando el mismo software fue llevado a cabo por Rehder[231] en su estudio sobre el efecto de la estructura de poro y la fibra sobre la tenacidad de concreto poroso. Para esta prueba se fotografiaron y analizaron 33 probetas. En el Anexo B se discrimina la cantidad ensayada para cada tipo de concreto.

La fibra y la matriz cementicia se observaron en los microscopios óptico y electrónico para establecer su adherencia. Esta examinación consistió en visualizar de manera preliminar mediante MOP la presencia de fibra en muestras fracturadas de concreto; de esta forma fueron seleccionados los especímenes que se observaron en el microscopio electrónico, en el cual se comprobó la presencia y condición de la fibra. Los equipos utilizados en esta etapa de la investigación fueron un estereomicroscopio marca *OLYMPUS* referencia *SZ61* y el microscopio electrónico marca *JEOL* de la Universidad de los Andes. Las muestras fracturadas para el MEB fueron recubiertas con oro (Au) y observadas a 20 kV, siguiendo el procedimiento usado por Megiatto[232] para mostrar la zona de transición interfacial de los compuestos de matriz fenólica reforzados con fibra de sisal. Adicionalmente, se hizo análisis químico mediante EDS a 1000X y por 120 segundos, con el fin de determinar semicuantitativamente los elementos químicos[233] presentes en las muestras de concreto en estudio. Cabe señalar que las microestructuras en el MEB se examinaron aproximadamente un año después de su fabricación. Fueron

[231] REHDER, Benjamin; BANH, Kingsten; NEITHALATH, Narayanan. Fracture behavior of pervious concretes: the effects of pore structure and fibers. Febrero 7 de 2014. Revista Engineering Fracture Mechanics. 118, p. 3. (Recuperado el 3 abril 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/engfracmech.

[232] MEGIATTO Jr., Jackson D.; RAMINRES, Elaine C.; FROLLINI, Elisabete. Phenolic matrices and sisal fibers modified with hydroxy terminated polybutadiene rubber: Impact strength, water absorption, and morphological aspects of thermosets and composites. Octubre 3 de 2009. Revista Industrial Crops and Products, 31, p. 180. (Recuperado el 10 abril 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/indcrop.

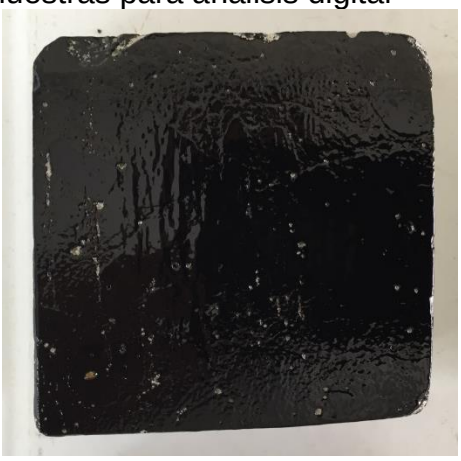
[233] SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. Julio 3 de 2002. Revista Cement and Concrete Composites, 25, p. 313. (Recuperado el 10 febrero 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

analizadas mediante MEB un total de 101 muestras. En el Anexo B se discrimina la cantidad ensayada para cada tipo de concreto.

Figura 31. Procedimiento de preparación de muestras para análisis digital



31a. Muestra de concreto pulida y seca



31b. Muestra de concreto con tinta negra



31c. Muestra con exceso de ZnO



31d. Muestra lista para análisis

Por último, se evaluaron muestras de concreto con y sin jugo de fique, y con aditivo comercial, con 28 días de curado mediante DRX en el Laboratorio de Rayos X de la UIS. Los especímenes seleccionados fueron molturados, homogenizados en un mortero de ágata y llevados a un tamaño de partícula menor a 38 µm (400 mesh). Posteriormente, las muestras fueron montadas en un porta-muestra. Los registros

de datos se realizaron en un difractómetro de polvo marca *BRUKER* modelo *D8 ADVANCE* y el registro de datos se hizo en el rango de 3,5º (2θ) a 70º (2θ), tiempo por paso 0,6 s, paso 0,02035º (2θ), con tiempo de duración de la medida de 30 minutos. Fueron analizadas mediante DRX un total de 12 muestras.

Para la determinación del efecto de las variables en estudio sobre las propiedades en estado endurecido se usó el software estadístico *Statgraphics Centurion XV,* realizando un análisis estadístico inferencial de diseño experimental factorial multivariable, haciendo un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95% y α = 0.05, siguiendo las condiciones para el análisis estadístico de Savastano Jr.[234] en su investigación sobre refuerzo de fibras de desecho en compuestos de base cementicia.

2.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados y el análisis correspondiente de esta parte de la investigación. En primer lugar se abordará lo concerniente a la caracterización de las propiedades en estado fresco y endurecido para las mezclas de *concreto con fibra*, de la misma manera se hará para las mezclas de *concreto con jugo de fique*, por último, se presentan las dosificaciones de concreto que contienen a la vez *fibra y jugo de fique*.

2.3.1 Propiedades fisico-mecánicas de concreto con fibra de fique.

En esta sección se presentan los resultados y discusión para los concretos adicionados con fibra en estado fresco y endurecido.

En primer lugar, se aborda el concreto fresco con las pruebas de asentamiento, densidad en estado fresco y pH; posteriormente, para el concreto endurecido se

[234] SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. Febrero 11 de 2000. Revista Cement and Concrete Composites, 22, p. 381. (Recuperado el 10 febrero 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

exhiben y discuten los resultados de las pruebas mecánicas, observación en el MEB, densidad seca global (Dsg) y porosidad abierta (interconectada o poros permeables). En la Tabla 6 se presenta la convención usada para los concretos adicionados con fibra de fique.

Tabla 6. Convención de concreto con fibra de fique

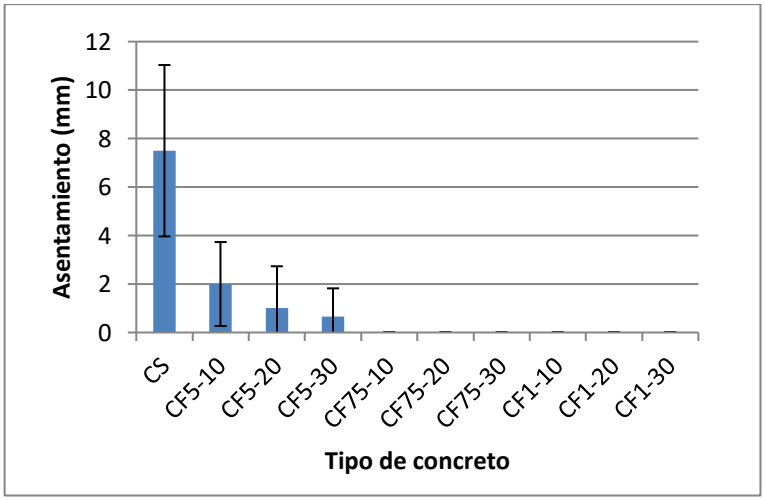
Tipo de concreto	Convención
Concreto simple	CS
CS + 0,5% de fibra y longitud de 10 mm	CF5-10
CS + 0,5% de fibra y longitud de 20 mm	CF5-20
CS + 0,5% de fibra y longitud de 30 mm	CF5-30
CS + 0,75% de fibra y longitud de 10 mm	CF75-10
CS + 0,75% de fibra y longitud de 20 mm	CF75-20
CS + 0,75% de fibra y longitud de 30 mm	CF75-30
CS + 1,0% de fibra y longitud de 10 mm	CF1-10
CS + 1,0% de fibra y longitud de 20 mm	CF1-20
CS + 1,0% de fibra y longitud de 30 mm	CF1-30

Para el concreto en estado fresco, el asentamiento de cada una de las mezclas de concreto reforzado con fibra se determinó mediante la prueba del cono de Abrams. Como se observa en la Figura 32, el concreto simple presentó un asentamiento de 7,50±3,54 mm, el cual disminuyó al aumentar la cantidad de fibra de fique adicionada al concreto. Según se percibe para las mezclas con 0,75% y 1,0% de adición, para cualquier longitud de fibra, el asentamiento fue de cero (0,0) mm. En este sentido, Carrillo[235] y Ali[236] también reportaron disminución en el asentamiento, a pesar de haber trabajado respectivamente con fibras metálicas y fibra de coco; Carrillo reportó la disminución de la manejabilidad a medida que incrementó la

[235] CARRILLO, Julián; APERADOR, William; GONZÁLEZ, Giovanni. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería Investigación y Tecnología. Julio-septiembre, 2013, vol. XIV, no. 3. p. 447.
[236] ALI. Op. cit., p. 816.

cantidad de fibra en el concreto, especialmente para fibras con longitud igual a 60 mm, por su parte Ali reportó en el concreto fibro-reforzado un asentamiento bajo en el orden de 10-40 mm.

Figura 32. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra de fique



En el concreto con 0,5% se observó, sin diferencia significativa, con mayor claridad la reducción en el asentamiento a medida que la fibra tenía mayor longitud, mientras que en las dosificaciones con 0,75% y 1,0% de fibra este comportamiento no fue posible observarlo. Ahora bien, a mayor cantidad de fibra y a mayor longitud más difícil se volvía mezclar, por lo que el asentamiento de todos los concretos reforzados con fibra de fique fue menor que el de concreto simple. Según Aziz[237], la disminución en el asentamiento por la incorporación de fibra natural se debe al área superficial, específicamente por el tamaño y forma de las fibras. Mientras que para Ali[238], esta disminución significativa en el asentamiento y la dificultad en la trabajabilidad de la mezcla probablemente se produce por tres razones: i) la fibra absorbe agua debido a su carácter hidrofílico, porosidad y acción capilar de las

[237] AZIZ, M. A.; PARAMASIVAN, P.; LEE, S. L. Prospect for natural fibre reinforced concretes in construction. En: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Mayo, 1981, vol. 3, no. 2, p. 126.
[238] ALI. Op. cit., p. 817.

micro-celdas[239] lo que posiblemente modifica la relación (a/c) de la mezcla, ii) influencia de la superficie rugosa de la fibra y iii) el proceso de mezclado es adecuado ocasionando que las fibras se unieran con los demás componentes desde el estado fresco, es decir, hubo adhesión temprana durante el proceso de mezcla de los agregados y la fibra. Esta situación fue observada en esta la investigación logrando una distribución uniforme de la fibra en la mezcla cementicia como se muestra en la Figura 33.

La consistencia del concreto reforzado se visualiza en la Figura 33, esto se advirtió durante el mezclado, en la cual se observó que las partículas de agregado grueso eran rodeadas por la mixtura de mortero y fibra, lo que ocasionó que desde el principio se produjera unión entre los diferentes agregados constituyentes del concreto y la fibra de fique, indicando que la reología fue adecuada para la fabricación del sistema compuesto[240]. Este efecto tiende a conformar una distribución homogénea de fibras en la mezcla de concreto. Sin embargo, a pesar de la pérdida de asentamiento, la fabricación de las muestras de concreto reforzado con fibras se realizó satisfactoriamente, reportado de igual manera en otra investigación de concreto reforzado con fibra de coco por Ali[241]. Por otra parte para Fouad Wafa[242], la prueba de asentamiento convencional no es recomendable para concreto reforzado con fibras, por lo que exhorta al uso del ensayo de cono de asentamiento invertido para este tipo de concretos.

[239] QUINTERO GARCIA, Sandra Liliana; GONZALEZ SALCEDO, Luis Octavio. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. En: Ingeniería y Desarrollo. Julio- Diciembre, 2006, no. 20, p. 137.
[240] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 729.
[241] ALI. Op. cit., p. 817.
[242] FOUAD WAFA. Op. cit., p. 54.

Figura 33. Concreto con fibra de fique en estado fresco



33a. Consistencia de la mezcla de concreto con fibra de fique



33b. Mortero con fibra envolviendo al agregado grueso

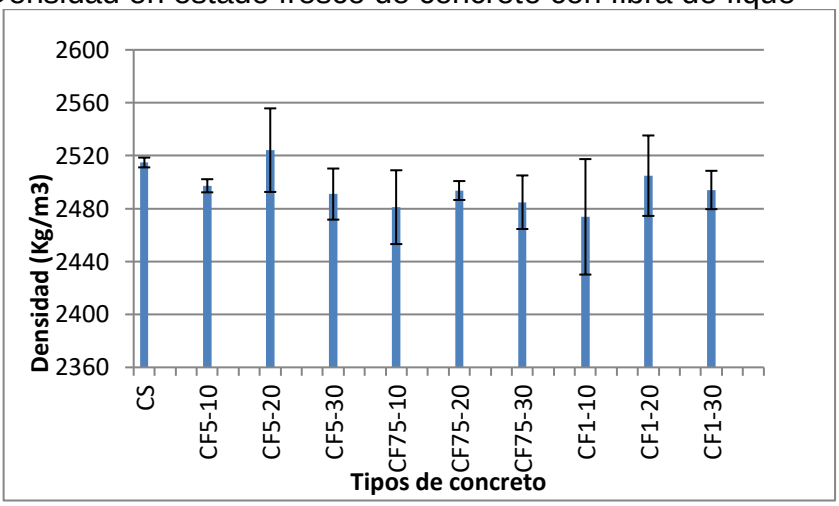
Se debe agregar que, con el fin de mejorar la trabajabilidad es habitual aumentar la relación a/c de la mezcla a expensas de la resistencia a la compresión, asimismo, usar ciertos aditivos que pueden mejorar la manejabilidad y la resistencia del concreto[243]. Sin embargo, en esta investigación no se podía adicionar más agua e incrementar la relación a/c, ni agregar algún tipo de aditivo plastificante, puesto que era necesario conocer el efecto de la fibra de fique sobre el material compuesto; además, porque posteriormente se iba a estudiar el impacto de añadir jugo de fique a la mezcla de concreto con y sin fibra.

Con relación a la densidad en estado fresco, en el diagrama de columnas de la Figura 34 se observa, a excepción de la mezcla CF5-20, que los concretos adicionados con fibra mostraron una leve disminución respecto al concreto simple, sin embargo, estas variaciones no fueron estadísticamente significativas entre sí. Esto probablemente obedezca a la baja densidad de la fibra natural en comparación

[243] AZIZ, M. A. Op. cit., p. 126.

con los constituyentes del concreto, un comportamiento similar fue reportado por Osorio[244] en concreto reforzado con fibra de bagazo de caña de azúcar.

Figura 34. Densidad en estado fresco de concreto con fibra de fique



Respecto al valor del pH de concreto con y sin fibra éste tuvo un valor de 12,54±0,04; lo cual indica que el concreto reforzado no presentó variaciones por la adición de la fibra de fique, esto se debe a que la fibra es una adición física que no produce un cambio químico que modifique el pH del material compuesto.

Para el estado endurecido, los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se muestran en las Figuras 35 y 36, que corresponden, respectivamente, a los diagramas de pareto y de medias. Estos diagramas se lograron por medio del análisis estadístico inferencial factorial multinivel usando como herramienta el software estadístico *Statgraphics Centurion XV*. Los resultados del ensayo mostraron que la longitud de la fibra (Figuras 35 y 36b) no tiene efecto significativo sobre ésta propiedad, en otras palabras, las longitudes de fibra usadas en la investigación no presentaron influencia sobre la resistencia a la compresión.

[244] OSORIO SARAZ, Jairo Alexander; VARON ARISTIZABAL, Fredy; HERRERA MEJIA, Jhonny Alexander. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. En: Revista DYNA. Noviembre, 2007, vol. 74, no. 153, p. 76.

Por otra parte, según el análisis estadístico, la cantidad de fibra de fique en la mezcla tiene un efecto negativo (Figura 35) sobre la resistencia a la compresión, es decir, a medida que aumentó la proporción de fibra en la mezcla, esta propiedad disminuyó, presentando un comportamiento inversamente proporcional con la adición de fibra. Además, en la Figura 36a se aprecia que no hubo diferencia significativa entre las mezclas con 0,5% y 0,75% de fique, mientras que sí se presentó diferencia significativa entre las proporciones anteriores y la mezcla con 1,0% de fibra. También hubo diferencia significativa entre el concreto sin fibra y aquellos que tenían el refuerzo de fibra, como se mencionó, disminuyendo el valor de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión obtenida en el día 28 para el concreto simple fue de 29,61±0,70 MPa, la cual se mantuvo aproximadamente en 86% para la mezcla con 0,5% de fibra y en 61% para la dosificación con 1,0% de fique, esto causado por la adición de la fibra de fique a la mezcla cementicia. Los valores de resistencia a la compresión obtenidos en esta investigación fueron superiores a los reportados por Osorio Saraz[245] quien obtuvo para 0,5% de refuerzo de fibra de bagazo de caña de azúcar hasta 79,6% de la resistencia a la compresión inicial; por su parte, Pinzón Galvis[246] para 0,5% de adición de fibra de fique logró 67% y 41% de la resistencia original para concretos de 21 MPa y 24,5 MPa respectivamente, mientras que Ardanuy[247] para refuerzo de fibras de celulosa obtuvo 63% de la resistencia a la compresión con relación al concreto simple. Pinzón Galvis[248] además de reportar la disminución en la resistencia a la compresión anteriormente señalada cuando fue añadida la fibra de fique, establece que el porcentaje de adición más favorable fue 0,5% del peso de agregado fino.

[245] OSORIO SARAZ. Op. cit., p. 74.
[246] PINZON GALVIS, Sandra. Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. En: Revista Ingenierías. Octubre-Diciembre, 2013, vol. XVI, no. 61, p. 34.
[247] ARDANUY. Op. cit., p. 121.
[248] PINZON GALVIS. Op. cit., p. 35.

Figura 35. Diagrama de pareto estandarizado de resistencia a la compresión de concreto con fibra

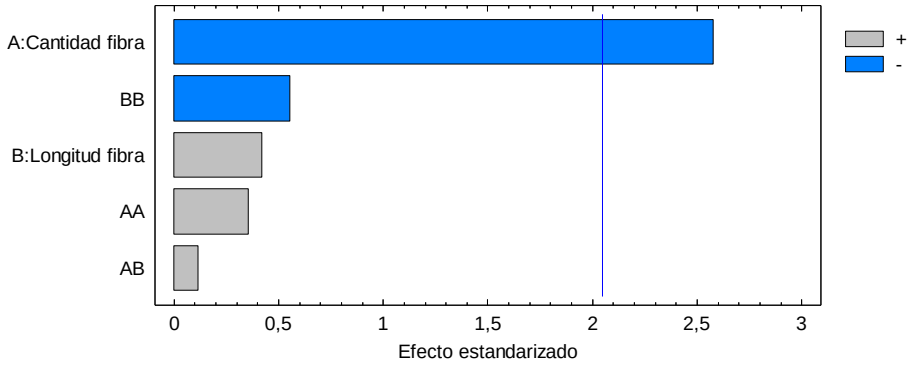
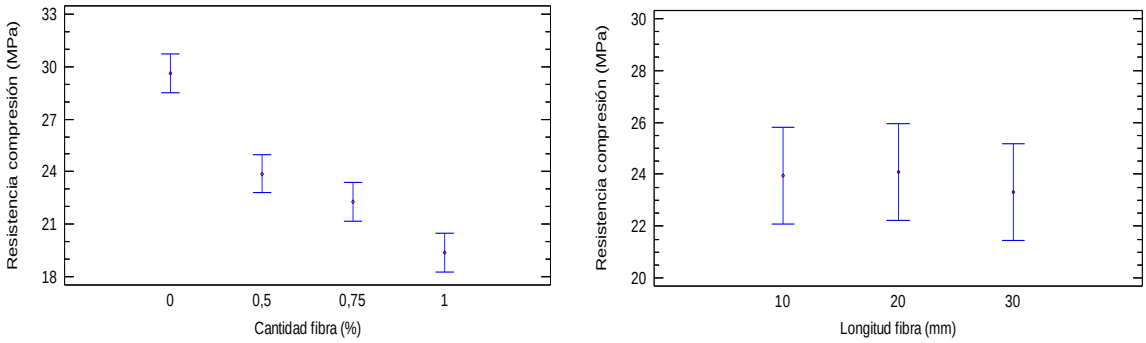


Figura 36. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con fibra



36a. Medias para cantidad de fibra

36b. Medias para longitud de fibra

Para el autor de esta investigación, la disminución en la resistencia a la compresión se atribuye a tres factores: i) la naturaleza de los materiales constituyentes, ii) la porosidad de la fibra de fique (la presencia del lumen, por donde se alimenta la planta de agua y nutrientes, es un espacio vacío una vez la fibra es extraída de la planta), los poros de la fibra actúan como generadores de fallas en el compuesto durante el esfuerzo a compresión, iii) débil enlace fibra-matriz provocado por el aumento de puntos de anclaje de la fibra con la matriz cementicia, además, la generación de regiones de separación entre ambos componentes, que se pueden

considerar como vacíos inducidos por la formación de sitios donde se ubica la fibra y como es ampliamente conocido, la resistencia a la compresión está relacionada con el contenido de vacíos dentro del material compuesto[249]. Estas razones también fueron consideradas por Martinez Barrera[250] en su estudio sobre concreto reforzado con fibra de Luffa. Aunado a lo anterior, la absorción de humedad durante el mezclado produce cambios dimensionales volumétricos en la fibra[251], lo cual genera espacios entre la fibra y la matriz una vez la fibra pierde su humedad.

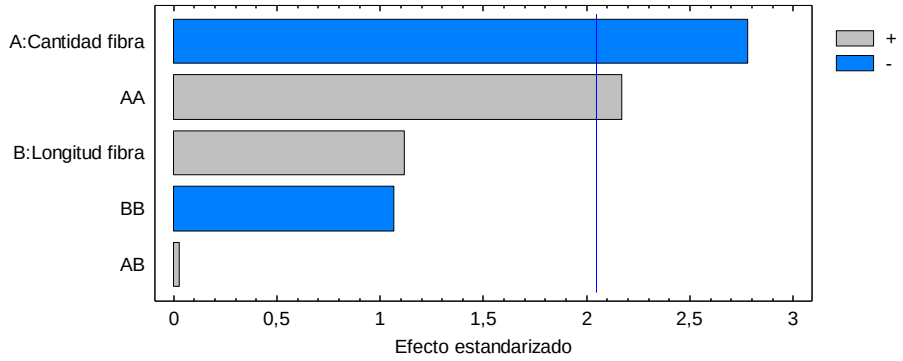
El ensayo de tracción indirecta se realizó a probetas cilíndricas sometiéndolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha a lo largo de toda su longitud. En consecuencia, el resultado es una fuerza de tracción ortogonal resultante que origina que la probeta se rompa a tracción[252]. De igual forma que en el ensayo de compresión, durante la realización de las pruebas de tracción indirecta se observó que el concreto simple, una vez alcanzaba la carga de rotura, presentaba una fractura frágil con división de la probeta en partes; en contraste, las probetas reforzadas con fibra lograron un comportamiento dúctil después de la fisuración e incluso continuando la aplicación de carga, exponiendo la transmisión de tensiones a las fibras al “coser” la falla impidiendo la separación de las muestras.

En las Figuras 37 y 38 se presentan los efectos producidos por la adición de fibra sobre la resistencia a la tracción indirecta. La Figura 37 permitió establecer que la cantidad de fibra tiene un efecto negativo sobre la resistencia a la tracción indirecta, mientras que la longitud de la fibra tiene efecto positivo, pero no significativo sobre ésta propiedad mecánica, de la misma forma como ocurrió ante la carga de

[249] FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. Agosto 17 de 2014. Revista Composites: Part B, 68, p. 18. (Recuperado el 17 septiembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.
[250] MARTINEZ BARRERA, Gonzalo; MARTINEZ LOPEZ, Miguel; MARTINEZ CRUZ, Elisa. Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa. En: Información Tecnológica, abril, 2013, vol. 24, no. 4, p. 70.
[251] JUAREZ, Cesar; VALDEZ, Pedro; DURAN, ALEJANDRO. Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción. En: Revista Ingeniería de Construcción, agosto, 2014, vol. 19, no. 2, p. 89.
[252] FIGUEROA ANDRADE, Manuel. Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional, hormigón reforzado con fibras de acero y hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Tesis de Magister en Ingeniería de las Cimentaciones, Estructuras y Materiales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2012-2013, p. 46.

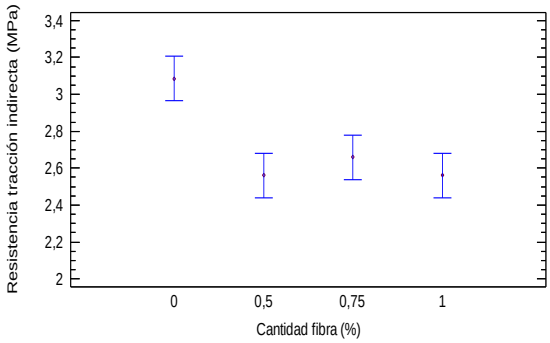
compresión. Por otro lado, la Figura 38a muestra que no hay diferencia significativa entre las mezclas con 0,5%; 0,75% y 1,0% de fique. En cambio, sí existe diferencia estadística significativa entre el concreto sin fibra y aquellas mezclas con fibra de fique, mostrando disminución en la resistencia a la tracción indirecta a medida que aumenta la cantidad de fibra de fique en el material. Lo anterior se refleja en la resistencia a la tracción indirecta obtenida en el día 28 para concreto simple que fue en promedio de 3,09±0,27 MPa, mientras que con la adición de fibra ésta propiedad disminuyó, logrando mantenerse entre el 97% y 77% para las dosificaciones con 0,75% y 1,0% de fibra, respectivamente. Para Ali[253] la resistencia a la tracción disminuyó con un mayor contenido de fibra de coco, incluso hasta un 11% dependiendo de la cantidad de fibra adicionada.

Figura 37. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra de fique

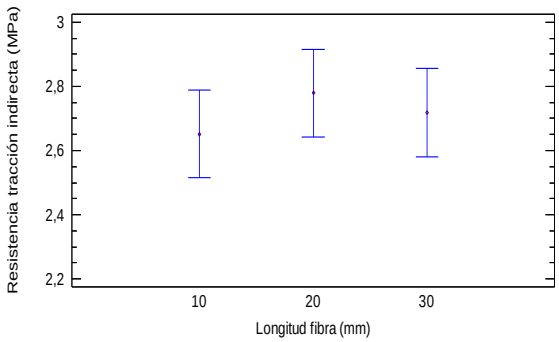


[253] ALI. Op. cit., p. 818.

Figura 38. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra de fique



38a. Medias para cantidad de fibra



38b. Medias para longitud de fibra

Para el caso de 1,0% de fibra de fique en la mezcla, el exceso de microfibras saturó la mezcla de concreto, provocando mayor dificultad en la compactación, incluso, la acumulación de fibras formando pelotas en algunas de las muestras. De igual forma lo reportó Figueroa Andrade[254], aunque su adición fue fibra de acero y de polipropileno. En esta investigación, el más alto contenido de fibra de fique produjo la mayor reducción de resistencia por tracción indirecta en las muestras de concreto, similar a lo reportado por Azis[255]. Además, para Dias Toledo Filho[256] el comportamiento a tracción del concreto reforzado no solo depende de la fracción de volumen de la fibra, también depende de la resistencia y longitud de la misma. Aunque en la presente investigación, como se aprecia en la Figura 38b, no hubo influencia de la longitud de la fibra sobre la resistencia a la tracción indirecta, de igual forma como ocurrió con la resistencia a la compresión.

De otro lado vale mencionar que las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras no sólo obedecen a las propiedades de la fibra, también dependen de la forma en que una carga se transmite a ésta por medio de la matriz.

[254] FIGUEROA ANDRADE. Op. cit. p. 61.
[255] AZIZ, M. A. Op. cit., p. 126.
[256] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 247.

En este proceso de transmisión de carga es muy importante que las fuerzas de adhesión entre la interfaz matriz-fibra sea suficiente para soportar los esfuerzos de tracción. Al aplicar este tipo de esfuerzo, la unión fibra-matriz termina en los extremos de la fibra y en la matriz se forma un patrón de deformación, en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga[257].

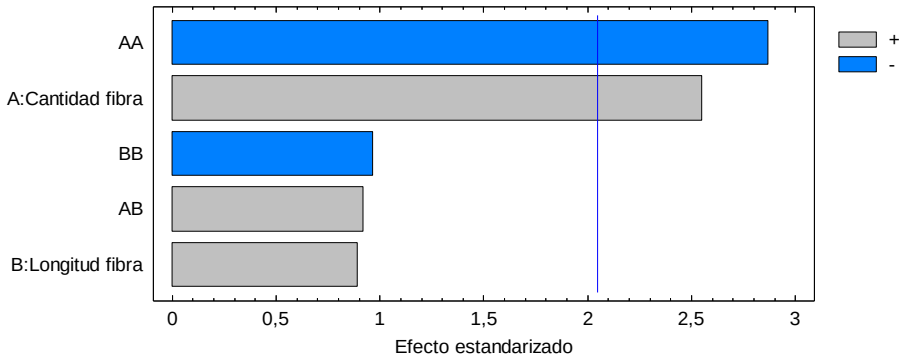
Existen dificultades para llevar a cabo pruebas de tracción en especímenes de concreto reforzado con fibras, por lo que, la prueba de flexión es la más representativa en concretos fibro-reforzados, pues a partir de ella se puede estimar la capacidad de deformación que la fibra le proporciona al concreto después de alcanzar la máxima resistencia a flexión[258].

En relación con la resistencia a la flexión del concreto adicionado con fibras, la variación en la longitud de la fibra tuvo un efecto positivo pero no significativo sobre esta propiedad, del mismo modo que ocurrió con los resultados a compresión y tracción indirecta, como se muestra en las Figuras 39 y 40b. En contraste, la adición de fibra tuvo un efecto positivo y significativo sobre la resistencia a la flexión, es decir, esta propiedad mecánica aumentó a medida que era mayor la proporción de fibra de fique en la mezcla de concreto, excepto para la adición con 1,0% de fibra, como se aprecia en las Figuras 39 y 40a. Asimismo, en la Figura 40a se observa que hubo diferencia significativa entre la dosificación de control y las adicionadas con fibra. Además, no hay diferencia significativa entre las mezclas con 0,5% y 1,0% de fibra de fique, mientras que, la adición con 0,75% presentó el mejor comportamiento a flexión. En este sentido, todas las adiciones con fique incrementaron su módulo de rotura en flexión entre 10% y 30%, lo que concuerda con el aumento del 20% logrado por Juarez Alvarado[259], con el aumento del 10%

[257] PARRA LOPEZ, Andrés Guillermo; PARRA MEJIA, Marco Fidel. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra. Tesis en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Fisicomecánicas. 2007, p. 16.
[258] CARRILLO. Op. cit., p. 438.
[259] JUAREZ ALVARADO. Op. cit., p. 474.

para una mezcla con 0,3% de fique reportado por Pinzón Galvis[260] y asimismo, con el aumento del módulo de rotura a flexión con la adición de fibra metálica para Rodriguez Villareal[261].

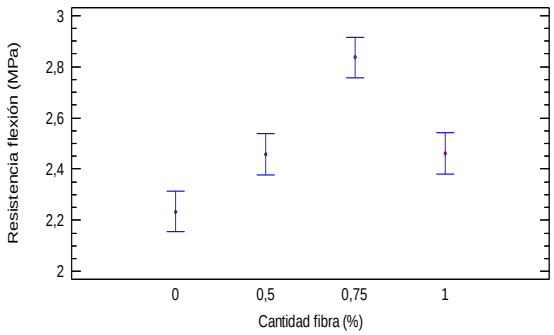
Figura 39. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la flexión de concreto con fibra de fique



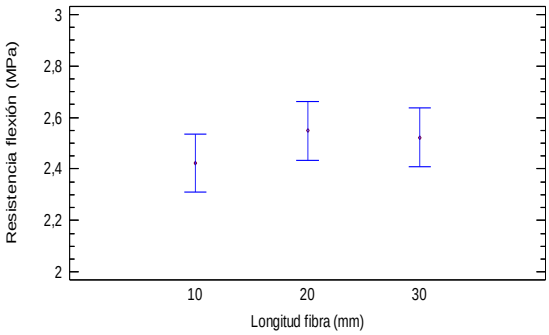
Vale la pena aclarar que, aunque la norma considera la falla fuera del tercio medio de la vigueta, en esta investigación, se tuvo en cuenta lo reportado por Hernández Vicente[262], con relación a que el esfuerzo se incrementa exponencialmente para los esfuerzos medidos fuera del tercio medio de la vigueta y alrededor de los apoyos, lo cual podría conllevar a resultados erróneos en las pruebas; por lo tanto, aquellos especímenes que rompieron por fuera del tercio medio no se tuvieron en cuenta y su medición se repitió.

[260] PINZON GALVIS. Op. cit., p. 31.
[261] RODRIGUEZ VILLAREAL, Fredy Arnulfo. Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzados con fibras metálicas. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, 2013, p. 46.
[262] HERNANDEZ VICENTE. Op. cit., p. 91.

Figura 40. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con fibra de fique



40a. Medias para cantidad de fibra



40b. Medias para longitud de fibra

A diferencia de los resultados de resistencia a la compresión y tracción indirecta de los concretos adicionados con fibra de fique, la resistencia a la flexión de éstos mejoró con relación al concreto simple cuando aumentó la cantidad de fibra de fique en la mezcla de concreto, logrando aumentar el módulo de rotura a flexión aproximadamente entre 9% y 32% respecto a la muestra control, mientras que para Ardanuy[263] la mejora fue de 58% usando 8% de pulpa de sisal. Esto se da porque la adición de fibras en un elemento sometido a flexión es más efectiva que en uno sometido a compresión o a tracción, ya que se aprovecha mejor la distribución de la fibra en el concreto reforzado y por ende su capacidad de redistribución de esfuerzos antes de la fractura. Lo anterior indica que la fibra influye sobre el esfuerzo aplicado a flexo-tracción, interviniendo durante el proceso de carga hasta la rotura; posterior al agrietamiento del concreto las fibras contribuyen, principalmente, a proporcionar ductilidad cuando hay suficientes fibras presentes que trabajan como puente entre las partes, coincidiendo con lo reportado por Dias Toledo Filho[264] y Pesic[265]. Esto evidencia que el proceso de diseño y fabricación fue adecuado, y que

[263] ARDANUY. Op. cit., p. 122.
[264] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 248.
[265] PESIC, Ninoslav; et al. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. Abril 22 de 2016. Revista Construction and Building Materials, 115, p. 362. (Recuperado el 27 octubre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

el material fibro-reforzado absorbió energía adicional posterior a la fisuración hasta el fallo final de la muestra, asimismo fue reportado por Bayramov[266] en su trabajo sobre energía de fractura de concreto reforzado con fibra.

Probablemente el comportamiento decreciente para los esfuerzos de compresión y tracción indirecta cuando aumentó la cantidad y longitud de fibra de fique en la mezcla de concreto, también está asociado con la trabajabilidad de las distintas mezclas, puesto que algunas fibras probablemente no se distribuyeron adecuadamente al azar[267], provocando que estas se agruparan formando bolas de fibra, lo que dio como resultado una unión inadecuada y una reducción marcada en estas propiedades mecánicas[268], modificando el comportamiento mecánico en estado endurecido[269] especialmente en algunas muestras con la mayor dosificación y longitud (CF1-30).

Con relación a la longitud de la fibra, ésta no tuvo influencia sobre las propiedades mecánicas medidas en esta investigación, probablemente por el rango de longitud trabajado, es decir, se considera microfibra a fibra con longitud inferior a 30 mm, por lo tanto, a pesar de ejercer un efecto positivo no fue estadísticamente significativo para el estudio.

En la Figura 41 se muestra el resultado de la inspección visual realizada a muestras de concreto sometidas a los ensayos de compresión (Figura 41a y 41c), tracción indirecta (Figura 41d) y viguetas fracturadas durante la prueba de flexo-tracción (Figuras 41b, 41e y 41f). Para el caso de cilindros sin refuerzo se observa

[266] BAYRAMOV, F.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. Junio 25 de 2003. Revista Cement & Concrete Composites. 26, p. 665. (Recuperado el 27 octubre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
[267] FOUAD WAFA. Op. cit., p. 59.
[268] AZIZ, M. A. Op. cit., p. 125.
[269] SAIKIA, Nabajyoti; DE BRITO, Jorge. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. Diciembre 5 de 2013. Revista Construction and Building Materials, 52, p. 236. (Recuperado el 17 septiembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

desprendimiento de concreto (Figura 41a), mientras que solo se producen grietas para los cilindros fibro-reforzados (Figuras 41b y 41d), asimismo, reportado por Ali[270]. Durante las pruebas se observó que la falla a compresión se presentaba con formación de grietas verticales y diagonales a lo largo del cilindro, similar al de concreto simple (Figura 41a), pero sin ocurrencia de la falla de manera explosiva (Figura 41c). Este fenómeno se atribuye a que la adherencia del fique con la matriz ayuda a que la deformación del espécimen sea lenta y progresiva[271], además, una vez se alcanza el valor de rotura, la ductilidad se ve influenciada por la adición de fibras[272].

En todos los casos durante los ensayos de los concretos fibro-reforzados se observó que, una vez la probeta alcanzaba el valor de rotura, la fibra actuaba soportando la carga y manteniendo unidas las partes de la muestra. En otras palabras, la fibra de fique evita que la falla sea súbita o repentina (Figuras 41a y 41b) mejorando el control de las grietas y preservando la integridad estructural posterior a la fisuración de los miembros[273]. Se observó que la primera fisuración producida en el ensayo de flexión era casi imperceptible (Figura 41e), y la prueba de flexión se extendió hasta lograr la apertura total de la grieta. En las Figuras 41d y 41f se aprecia que la fibra actúa como puente entre las partes fracturadas del concreto. Este comportamiento se presentó en todas las mezclas de concreto fibro-reforzado sin importar la cantidad de fibra y su longitud, incluso, se observó durante las pruebas de compresión (Figura 41c) y tracción indirecta (Figura 41d). Esta característica exhibida durante las distintas pruebas, causan en el material fibro-reforzado una mayor absorción de energía por acción de las fibras distribuidas al azar, distribución que se observa en la Figura 42.

[270] ALI. Op. cit., p. 818.
[271] Ibid. p. 34.
[272] FOUAD WAFA. Op. cit., p. 54.
[273] FOUAD WAFA. Op. cit., p. 52.

Figura 41. Fractura de concreto reforzado sin y con fibra de fique



Figura 41a. Rotura por compresión de concreto simple

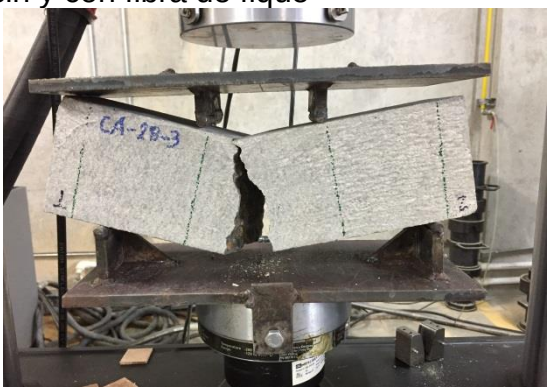


Figura 41b. Rotura por flexión de concreto simple



Figura 41c. Rotura por compresión de concreto reforzado con fibra



Figura 41d. Rotura por tracción indirecta de concreto reforzado con fibra



Figura 41e. Rotura por flexo-tracción concreto reforzado con fibra



Figura 41f. Rotura por flexo-tracción concreto reforzado con fibra

Los especímenes de concreto fibro-reforzado sometidos a flexión mostraron que la grieta inicia en la parte inferior, donde la tensión es mayor y se propaga a través del espesor hasta el extremo opuesto. Al continuar aplicando la carga, después de producirse el primer agrietamiento, la región por delante de la fisura, llamada *zona de proceso de fractura*[274], la grieta incrementa su apertura; es aquí donde las fibras exhiben que están soportando la carga, ya que atraviesan las grietas proporcionado ductilidad posterior a la fisuración[275] generando un solo plano de falla sin la formación de pequeñas grietas adicionales a la primera.

La Figura 42 permite examinar la superficie de fractura de las viguetas sometidas a flexión, donde se visualizan 2 aspectos importantes referentes a materiales fibro-reforzados, a saber: i) la distribución de las fibras en la matriz cementicia y ii) la adherencia de la fibra con la matriz. En cuanto al primer aspecto, el procedimiento de mezcla de los distintos concretos fibro-reforzados proporcionó adecuada distribución de las fibras en la matriz cementicia, presentando, en contados casos, agrupación de manojos de fibra en distintas zonas de las probetas (cilindros o viguetas), específicamente en las mezclas con el más alto contenido de fibra, esto es 1,0% de fibra de fique. Con relación al segundo aspecto, las imágenes de la Figura 42 permiten observar que posterior a la rotura del espécimen, la fibra de fique demostró adherencia con la matriz cementicia, es decir, la fibra permaneció en la cavidad formada durante el proceso de endurecimiento, al menos en uno de sus extremos en la superficie de fractura, situación que será presentada con mayor claridad en las imágenes de MEB de la Figura 45. Además, solo algunas fibras presentaron rotura, a pesar de que soportaban la carga aplicada una vez ocurría la fractura de la matriz. De esta forma, autores como Bayramov[276] y Ali[277] observaron en sus investigaciones el mecanismo de falla de la fibra.

[274] BAYRAMOV. Op. cit., p. 665.
[275] DIAS TOLÊDO FILHO. Op. cit., p. 246.
[276] BAYRAMOV. Op. cit., p. 669.
[277] ALI. Op. cit., p. 819.

Figura 42. Superficie fracturada por rotura a flexo-tracción



Figura 42a. Fibra en superficie fraturada



Figura 42b. Distribución de la fibra de fique en superficie fraturada

También se observaron cavidades dejadas por las fibras extraídas de la matriz durante el proceso de carga. En este sentido, para Blanco[278], la extracción de las fibras implica 4 etapas: separación, desprendimiento de la matriz, deslizamiento por fricción y extracción. En la primera de estas etapas, después de formarse una grieta, las fuerzas de tracción se transmiten a través de tensiones tangenciales desde la matriz hacia la superficie de la fibra. Una vez que las tensiones alcanzan la resistencia de la unión fibra-matriz cementicia, se lleva a cabo la separación. Después del inicio de separación de la fibra, cuando las tensiones llegan a niveles críticos, se produce el desprendimiento de la matriz. Una vez que se ha desligado toda la longitud incrustada, la fibra se desliza progresivamente y las fuerzas de fricción se activan como resultado del desplazamiento relativo entre la fibra y la matriz circundante. Por útimo, si la fibra se desplaza lo suficiente puede ser arrancada completamente de la matriz ocurriendo su extracción.

Con base en la evidencia observada, el autor de esta investigación considera que el mecanismo de extracción fue el que en su mayoría presentó la fibra de fique en

[278] BLANCO, A., et al. Influence of the Type of Fiber on the Structural Response and Design of FRC Slabs. En: J. Struc. Eng. 2016, vol. 142, no. 9, p. 2.

el material compuesto y en menor proporción algunas fibras exhibieron rotura. Esta última depende de la resistencia de la matriz de concreto y de la unión con las fibras; en otras palabras, la fibra puede romperse en lugar de deslizarse, lo que ocasiona cargas de extracción más bajas[279]. Oksman[280] considera que las fibras que exhiben rotura sufren fractura progresiva de fibras individuales con crecimiento de grieta y falla final, aludiendo a que presentaron alta adherencia con la matriz cementicia. Lo anterior conlleva a plantear que una baja adhesión interfacial conduce a la separación y extracción de fibra de la matriz cerca de los sitios de fractura con la correspondiente distribución de carga a las fibras vecinas, como posiblemente ocurrió en esta investigación.

Por otra parte, acerca del mecanismo de extracción de la fibra en el material fibro-reforzado, Blanco[281] considera que fibras con módulos de elasticidad bajo presentarán mayor desplazamiento como resultado del estiramiento antes de que comience la etapa de despendimiento de la matriz. Lo anterior, repercute en que se requiere mayor abertura de la grieta para comenzar a contribuir con la transmisión de tensiones.

El anclaje demostrado por la fibra de fique, probablemente sea producto de la irregularidad natural de la fibra, de su condición superficial y del proceso de mezclado llevado a cabo. Ahora bien, debido a que la sección transversal de la fibra de fique tiene diversas formas (estructural, arqueada y xilema), posiblemente contribuyó con el mecanismo de enlazamiento de la fibra con la matriz y posterior extracción. En este sentido, para De Andrade Silva[282], probablemente una de las razones para que se produzca adherencia entre la fibra y la matriz, sea porque las fibras de sisal, al igual que las de fique, presentan sección transversal irregular, lo cual mejora las características del enlace o unión con la matriz cementicia. También

[279] Ibid., p. 2.
[280] OKSMAN. Op. cit., p. 2364.
[281] BLANCO. Op. cit., p. 2.
[282] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 816.

De Andrade Silva[283] indica que esta diversidad de aspectos y formas geométricas influye en los resultados de las propiedades mecánicas al momento de ser medidas. Posiblemente la superficie corrugada y las variaciones que presenta al azar a lo largo de la longitud de la fibra ayuden en el proceso de anclaje con la matriz de concreto y con el mecanismo de extracción.

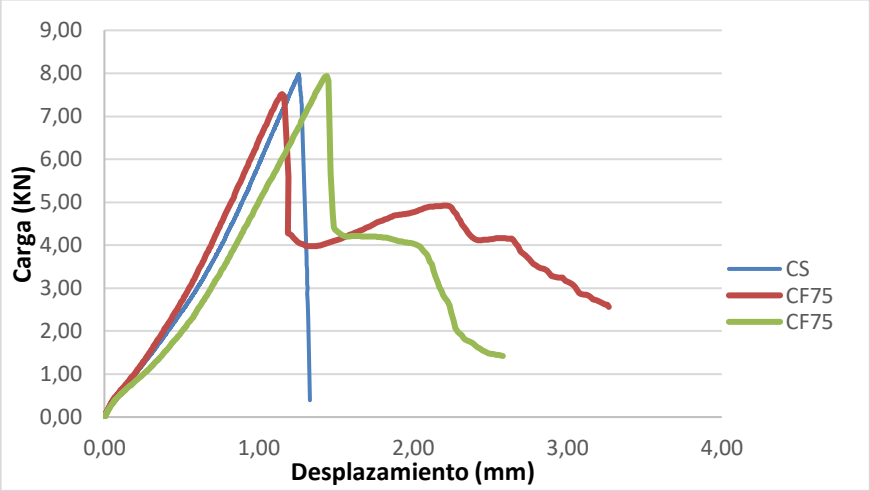
El comportamiento explicado a partir de la inspección visual, también se presenta en la Figura 43, en la cual, se comparan las gráficas del ensayo de flexión para una muestra de concreto simple y otras de concreto adicionado con fibra de fique. Allí se observa que la muestra de concreto sin refuerzo exhibe una fractura frágil, por otra parte, las muestras reforzadas manifiestan la acción de la fibra soportando la carga y evitando la separación de las partes; en otras palabras, las gráficas demuestran que la fibra actúa como puente posterior a la fisuración, por lo tanto, el concreto fibro-reforzado presenta ductilidad y tenacidad, absorbiendo mayor energía que el concreto sin refuerzo después de la rotura de la matriz.

Como se observa en la Figura 43, los especímenes fibro-reforzados durante el ensayo de flexión exhibieron antes del agrietamiento una parte recta correspondiente a un comportamiento elástico de la matriz y la fibra, según De Andrade Silva[284], dominado por las propiedades de la matriz y mínimamente dependiente de los parámetros de la fibra como el tipo, tamaño y cantidad[285]. Esta sección recta evidenció una mínima deflexión hasta que se alcanzó la carga máxima, donde apareció la primera grieta en la fase matriz. Posteriormente, los especímenes fibro-reforzados exhibieron sostenimiento de la carga o *softening* y en la última parte de las curvas CF-75 se observa que la carga disminuye paulatinamente, mientras que la deflexión se incrementa, evidenciando que

[283] Ibid., p. 816.
[284] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 725-726.
[285] WEI, Jianqiang; MEYER, Christian. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. Marzo 11 de 2015. Revista Cement and Concrete Research, 73, p. 6. (Recuperado el 10 noviembre 2017). Disponible en: http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp.

aumentó el ancho de la grieta al continuar con la aplicación de la fuerza. Autores como Pesic[286] y De Almeida Melo Filho[287] también reportaron que la falla fue seguida por una respuesta de carga sostenida de tracción con ensanchamiento de la grieta existente.

Figura 43. Comparación a flexo-tracción de concreto sin y con refuerzo de fique



Para Blanco[288] a medida que aumenta la deflexión, la carga resistida disminuye debido al deslizamiento progresivo de las fibras dentro de la matriz de concreto. Las fibras se activan a medida que aumenta la deflexión, limitando la abertura de la grieta[289], lo que permite la aplicación de carga adicional. En este sentido, el deslizamiento por fricción ocurrió con fuerza sostenida y decreciente a medida que se redujo la longitud del empotramiento de la fibra en la cavidad de anclaje de la matriz cementicia. El comportamiento expuesto, posiblemente se deba a que no se transfieren correctamente por adherencia los esfuerzos de tensión entre la fibra y la matriz[290]. Lo anterior refuerza el planteamiento de que la fibra falló por extracción

[286] PESIC. Op. cit., p. 365.
[287] DE ALMEIDA MELO FILHO, Joao; DE ANDRADE SILVA, Flavio; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. Abril 18 de 2013. Revista Cement & Concrete Composites, 40, p. 34. (Recuperado el 10 noviembre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
[288] BLANCO. Op. cit., p. 6.
[289] ALVES FIDELIS. Op. cit., p. 10.
[290] JUÁREZ ALVARADO. Op. cit., p. 16.

en lugar de por rotura, aunque, algunas viguetas exhibieron un crecimiento en la fuerza aplicada después de la caída de carga producto del agrietamiento, esto se explica por la transferencia de carga de la fibra a la matriz ocasionada por una mayor adherencia en la zona de transición interfacial (ZTI).

Como se mencionó, el material compuesto no soportó cargas crecientes después del primer agrietamiento de la matriz, excepto en algunas muestras, debido a que la resistencia a la extracción de las fibras es menor que la carga en la primera grieta (Juarez Alvarado[291]). En la sección agrietada, la matriz no resiste tensión alguna y las fibras soportan toda la carga aplicada al compuesto. El proceso de apertura de la grieta continuará hasta que la pérdida de adherencia local acumulada conduzca a la extracción de la fibra[292]. Según las observaciones realizadas en los especímenes, la falla por flexión inició al agrietarse la matriz; en ese momento la carga disminuyó, lo que indica que la fibra no actúo en el instante que se presentó la primera grieta, demostrando posiblemente una falla al transferirse esfuerzos de la matriz a la fibra debido a la falta de adherencia y a su bajo módulo de elasticidad. No obstante, posterior al agrietamiento de la matriz y disminución de la fuerza, la fibra fue capaz de sostener la carga de agrietamiento movilizando de manera eficiente la fibra presentando una respuesta de pseudo-endurecimiento[293], aunque no pudo soportar cargas crecientes, excepto en algunos casos (Figura 43), presentando siempre una macro-grieta representada en un solo plano de falla (Figura 41f).

Después de la fisuración, la reducción de la rigidez en la sección afectada es evidente, por lo tanto, la sección agrietada se activa en términos de transmisión de esfuerzos por tracción para la abertura de la grieta[294]. Lo anterior contribuye a una

[291] Ibid., p. 17-18.
[292] Ibid., p. 17-18.
[293] FRAZAO, Cristina, et al. Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete. Noviembre 10 de 2017. Revista Cement and Concrete Composites, 86, p. 221. (Recuperado el 17 junio 2018). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
[294] BLANCO. Op. cit., p. 5.

redistribución de las fuerzas internas[295] y a la capacidad global de la vigueta para soportar cargas adicionales, aunque, para el caso de esta investigación, fueron inferiores a la carga de fisuración.

Durante el desarrollo del mecanismo de extracción de la fibra de la matriz, se debe tener en cuenta que todas las fibras que cosen una fisura tienen diferente longitud de anclaje y orientación, esto significa que, existe la posibilidad de que algunas de ellas sean extraídas, mientras que otras siguen sometidas a cargas de tracción, esto conlleva a que el material fibro-reforzado aumente su ductilidad[296]. Lo anterior indica que en la fisura la longitud de anclaje debe ser lo suficientemente grande para que haya adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras.

Con el fin de demostrar el trabajo de la fibra posterior a la fractura, mostrado en la Figura 43, se calculó la energía absorbida por el material fibro-reforzado usando la herramienta computacional Matlab R2011b y tomando como parámetros la carga aplicada y la deflexión. En la Figura 44 se observa que la adición de fibra de fique causa que la energía absorbida por el material fibro-reforzado sea mayor, en todos los casos respecto al concreto sin refuerzo. En este sentido, los resultados mostrados en la Figura 44 concuerdan con los resultados del análisis estadístico inferencial, con el cual se demostró que la adición de fibra produjo un efecto positivo y significativo sobre el módulo de rotura a flexión.

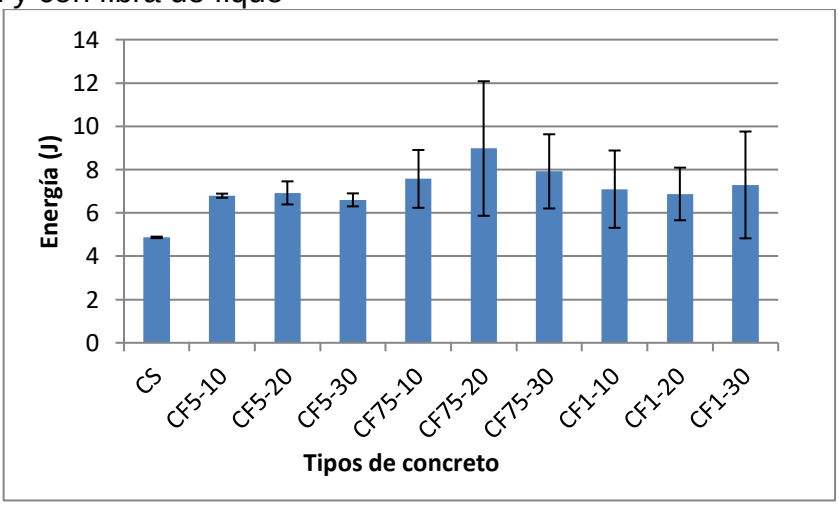
Por definición, la tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía, y se utiliza para caracterizar las posibilidades que posee el concreto reforzado con fibras de resistir la fractura, cuando éste está sometido a cargas estáticas, dinámicas y de impacto. La tenacidad, por cuanto a la capacidad de absorción de la energía se refiere, puede calcularse como el área bajo la curva carga-deflexión, que

[295] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 729.
[296] ALVES FIDELIS. Op. cit., p. 10.

es la energía total absorbida antes de completarse la separación de la muestra[297]. El concreto reforzado con fibras tiene una importante capacidad de absorción de energía durante la fractura, siendo las principales causas: i) la adherencia fibra-matriz, ii) los mecanismos de extracción y rotura de las fibras y iii) la apertura de las grietas.

Vale la pena tener en cuenta para este análisis que, cuando se trata de calcular la energía absorbida por el material, existe un inconveniente en particular y es que la energía se calcula a partir de la fuerza aplicada al espécimen y la deflexión, y estos valores no solo dependen de las características del material, también de las dimensiones de la probeta. Este último aspecto ocasiona, según Ardanuy[298] en su trabajo sobre concreto reforzado, que la comparación entre especímenes con diferentes dimensiones sea difícil.

Figura 44. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto sin y con fibra de fique



[297] MARAR, Khaled, et al. Relación entre la tenacidad a flexión y la energía de impacto en hormigones de alta resistencia reforzados con fibras (HSFRC). En: Materiales de Construcción. Abril-Junio, 2001, vol. 51, no. 252, p. 6.
[298] ARDANUY. Op. cit., p. 120.

Una de las funciones principales de la fibra en el concreto es proporcionar un aumento en la energía requerida para la fractura por el proceso resultante de detención de grietas[299]. En este sentido, la energía absorbida por los concretos fibro-reforzados fue entre 35% y 84% superior a la obtenida en el concreto patrón. Ali[300] obtuvo un aumento de 22% en concreto reforzado con fibra de coco. Los mayores valores de tenacidad, obtenidos a flexión, respecto al concreto simple, demostraron la ductilidad lograda por el material cementicio reforzado con fibra de fique. De igual forma reportado por De Andrade Silva[301] para concreto reforzado con fibra de sisal.

Por otra parte, para Savastano[302], la longitud de la fibra de refuerzo a menudo se correlaciona con la tenacidad a la fractura, lo cual, para el caso de esta investigación fue un factor que no influyó significativamente sobre las propiedades mecánicas del material compuesto, como se demostró en los resultados de resistencia a la compresión, tracción indirecta y módulo de rotura a flexión.

Como se expuso en párrafos anteriores, cuando el concreto fibro-reforzado se somete a una carga, la tensión se transfiere desde la matriz a la fibra, dando lugar, en la interfaz del material compuesto a la separación y extracción de la fibra de la matriz cementicia, este fenómeno genera pérdidas por fricción considerables que contribuyen a la tenacidad de fractura[303]. Lo anterior indica que existe una relación entre la fuerza aplicada y la tenacidad lo cual se asocia con la unión fibra-matriz[304].

Como se evidenció, la adición de fibra de fique a la matriz cementicia produjo ganancia en el módulo de rotura y en la energía absorbida, debido al mecanismo de separación y extracción de la fibra en el proceso de fractura, convirtiendo al concreto

[299] BAYRAMOV. Op. cit., p. 670.
[300] ALI. Op. cit., p. 815.
[301] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 728.
[302] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 383.
[303] Ibid., p. 383.
[304] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 315.

frágil en un compuesto dúctil. Lo anterior, se evidencia en la observación mediante MEB del material fibro-reforzado mostrado en la Figura 45. La Figura 45a muestra que las fibras tuvieron adherencia con la matriz, observándose cómo el mortero envuelve la fibra de fique, lo cual contribuye al aumento en el módulo de rotura por flexión y en la absorción de energía. Asimismo, la Figura 45b exhibe que, a pesar de la adherencia manifiesta, también las fibras presentaron separación con la matriz del orden de micras, evidenciando alguna carencia de adhesión del material reforzado.

Además, en la Figura 45b se muestra que algunas fibras de fique sufrieron rotura debido a la carga aplicada, lo que nuevamente evidencia adherencia entre la fibra y la matriz; por el contrario, otras fibras en lugar de romperse por causa de la carga aplicada, fueron arrancadas de la matriz de concreto dejando el espacio que ocupaban. Éste fenómeno se observó que ocurría con mayor frecuencia, siendo el mecanismo predominante en esta investigación. Estas observaciones demuestran lo sugerido por Savastano Jr[305], al referirse que cuanto más fuerte es la unión interfacial, menor es la tenacidad a la fractura, debido a que se presenta mayor incidencia de rotura de la fibra. Por el contrario, cuando el enlace interfacial es más débil hay mayor influencia por extracción de la fibra y, por lo tanto, mayor disipación de energía por fricción. En la Figura 45b también se observa que el agrietamiento producido durante la aplicación de la carga intersecta la fibra de fique, mecanismo que contribuye con el aumento del módulo de rotura y la ganancia de energía.

[305] Ibid., p. 315.

Figura 45. MEB de concreto con fibra de fique

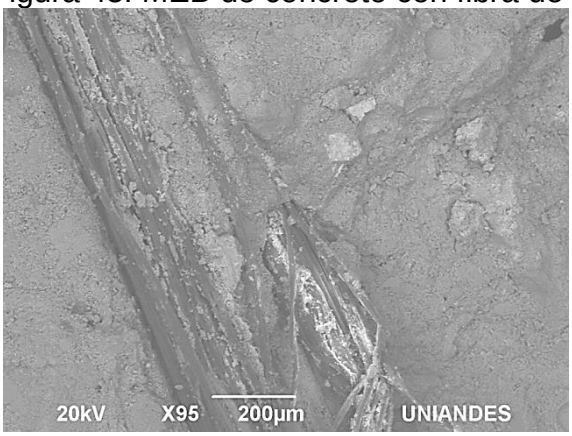


Figura 45a. Fibra de fique en la matriz de concreto (95X)

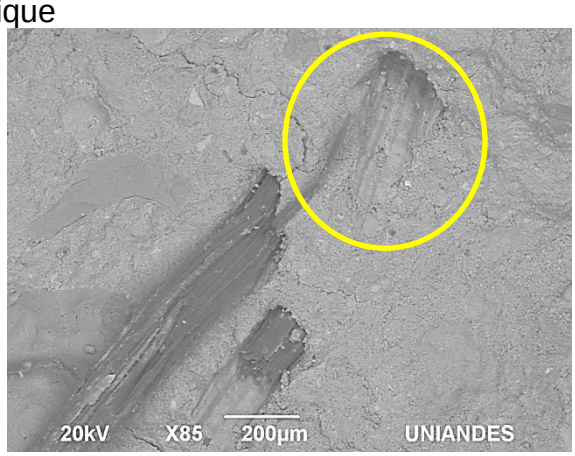


Figura 45b. Fibra de fique en la matriz de concreto (85X)

En este estudio, la adición de fibras fue más efectiva para aumentar el módulo de rotura, mientras que no contribuyó en un incremento de la resistencia a la tracción, debido a la falta de adherencia entre la matriz y la fibra, como se observa en las imágenes MEB de la superficie fracturada del material fibro-reforzado, reportado de igual manera por Carvalho[306].

Como las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra no solo dependen de las propiedades de los constituyentes[307] sino también de las propiedades de la región que rodea la fibra (interfase), debido a que la transferencia de carga de la matriz a la fibra tiene lugar en dicha interfase[308], es importante caracterizar lo ocurrido en este sitio. En este sentido, para Osorio Saraz[309] el espaciamiento mostrado entre la fibra y la matriz cementicia se debe posiblemente a la variación del diámetro en la sección transversal y a la irregularidad en el tamaño de la fibra, y a la ausencia de áridos más finos, lo que ocasiona menor compacidad en el concreto y por lo tanto disminución en la resistencia del material fibro-

[306] CARVALHO, Kelly C., et al. Chemical modification effect on the mechanical properties of hips coconut fiber composites. 2010, Revista Bioresources. 5(2), p. 1151 y 1152. (Recuperado el 5 febrero 2015). Disponible en: www.bioresources.com.
[307] ARDANUY. Op. cit., p. 123.
[308] HERRERA FRANCO. Op. cit., p. 598.
[309] OSORIO SARAZ. Op cit., p. 77.

reforzado. Para Ramli[310] la forma irregular de la cavidad que aloja a la fibra aumenta la fricción durante el proceso de extracción. Por su parte, Martinez Barrera[311] considera que algunos micro-canales de la superficie de la fibra no se llenan por completo por la arena sílice durante el proceso de elaboración del concreto, por lo que se genera cierto grado de porosidad en el interior del material compuesto.

Por otro lado, debido a su composición química, las fibras celulósicas son altamente hidrofílicas[312], esto las hace susceptibles a la absorción de humedad, lo cual origina inestabilidad dimensional (hinchazón) en su volumen[313]. Lo anterior, puede provocar pérdida de adherencia en la interfase fibra-matriz debido al desarrollo de enlaces de hidrógeno entre el agua y los grupos polares presentes en los componentes de la fibra[314], lo que produce una alta recepción de humedad, disminuyendo el desempeño mecánico de los compuestos reforzados con fibras naturales[315]. Es decir, como el proceso de absorción de agua está relacionado con la expansión y encogimiento de la fibra, cuando la humedad de las paredes de la fibra cae por debajo del nivel de saturación se produce el encogimiento. Este proceso reversible se vuelve perjudicial para compuestos basados en cemento Portland reforzados con fibras naturales porque produce que la fibra se separe de la matriz[316].

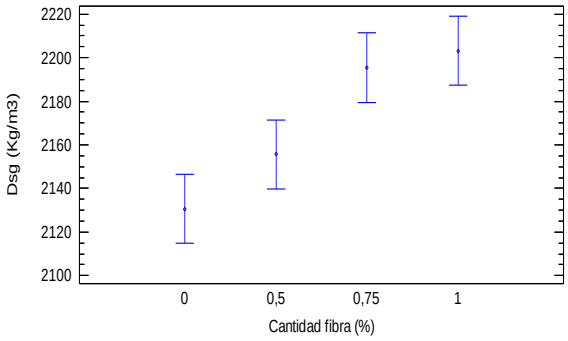
A pesar del espaciamiento mostrado entre la fibra y la matriz, la adherencia en el material compuesto fue lo suficientemente buena para aumentar la absorción de energía, asimismo, para controlar la fractura y el desprendimiento de partes de concreto, mediante el anclaje de las fibras de fique y la matriz de concreto, también

[310] RAMLI, Mahyuddin; HOE KWAN, Wai; FAISAL ABAS, Noor. Application of non-corrosive barchip fibres for high strength concrete enhancements in aggressive environments. Abril 17 de 2013. Revista Composites: Part B, 53, p. 143. (Recuperado el 12 julio 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.
[311] MARTINEZ BARRERA. Op. cit., p. 72.
[312] MONSALVE, Jonathan; SANCHEZ, Martha L.; BAQUERO, David. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de paneles reforzados con fibras de caña brava. Junio de 2016. Revista INGE CUC, vol. 4, no. 1, p. 67. (Recuperado el 23 marzo 2017). Disponible en: http://dx.doi.org/10.17981/ ingecuc14.1.2018.06.
[313] QUINTERO GARCIA. Op. cit., p. 137.
[314] MEGIATTO Jr. Op. cit., p. 184.
[315] YAN. Op. cit., p. 96.
[316] DELVASTO. Op. cit., p. 188.

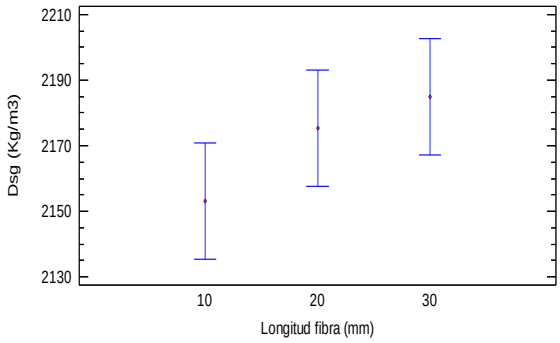
reportado por De Andrade Silva[317]. La longitud de fibra, que en esta investigación estuvo entre 10 mm y 30 mm, también influye sobre este mecanismo de anclaje gracias a la cantidad de fibras disponibles para cerrar la grieta[318], pero se presentó extracción de la fibra por la menor longitud de anclaje de la fibra en la matriz ocasionando falla interfacial.

Por otra parte, se estudió el comportamiento de la densidad para las distintas dosificaciones de concreto con fibra, a fin de determinar si la adición de fibra de fique provocaba alguna variación sobre esta propiedad. En la Figura 46 se presenta el comportamiento en estado endurecido de la densidad seca global (Dsg) para las diferentes dosificaciones de concreto.

Figura 46. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para Dsg de concreto con fibra de fique



46a. Medias para cantidad de fibra



46b. Medias para longitud de fibra

La densidad y la porosidad son propiedades físicas interrelacionadas, y estas a su vez con el rendimiento mecánico[319]. Como ocurrió con las propiedades mecánicas, en la Figura 46 se aprecia que la longitud de la fibra no tuvo diferencia significativa, mientras que la adición de fibra de fique produjo una mayor densidad en estado

[317] DE ANDRADE SILVA. Op. cit., p. 729.
[318] ALI. Op. cit., p. 820.
[319] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 316.

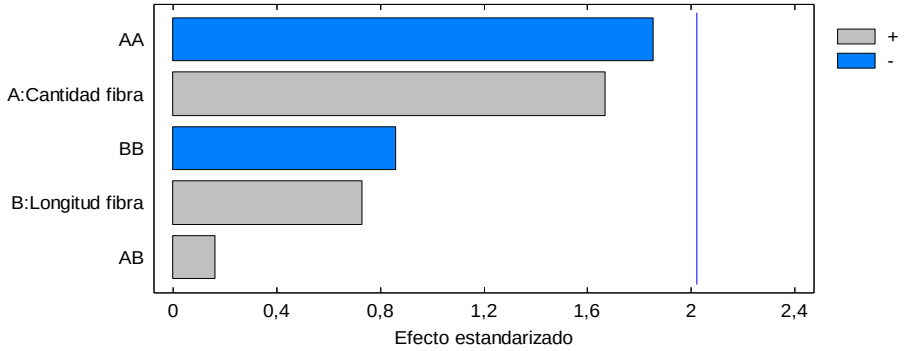
endurecido respecto al concreto simple. Los valores de densidad obtenidos para los concretos fibro-reforzados, se encuentran entre 2087 kg/m^3 y 2210 kg/m^3, mientras que la densidad del concreto simple fue de 2130 kg/m^3, resultados que corresponden a un concreto normal. El aumento en la densidad, probablemente fue causado por el carácter hidrofílico de la fibra, la cual absorbió agua durante el proceso de mezclado, lo que provocó una disminución en la cantidad de agua disponible para la mezcla, induciendo menor formación de poros por evaporación de agua. Asimismo, el incremento en la densidad posiblemente obedezca a que la fibra produjo mayor cohesión de las partículas en estado fresco y llenado de espacios vacios en estado endurecido en las diferentes mezclas del material compuesto en estudio. En contraste con los resultados de densidad obtenidos en esta investigación, Savastano Jr[320] y Ali[321] reportaron disminución en la densidad; en este sentido se debe tener en cuenta que estos investigadores mantuvieron los valores de asentamiento mediante ajustes en la cantidad de agua de la mezcla o con el uso de aditivos plastificantes.

Como se expuso anteriormente, para los concretos fibro-reforzados la porosidad fue una de las variables de respuesta de mayor relevancia, porque de ésta propiedad física dependía si los resultados de las propiedades mecánicas se debían a la variación de la porosidad o a la acción de la fibra de fique en el material cementicio reforzado. En este sentido, en la Figura 47 se presentan los resultados del análisis de varianza llevado a cabo para determinar el efecto de la adición de fibra en el concreto y su efecto sobre la porosidad del material. En ésta figura se aprecia que la cantidad y longitud de la fibra tuvieron un efecto positivo pero no significativo sobre la propiedad en estudio. Lo anterior, se comprobó mediante el análisis del gráfico de medias (Figura 48), en el cual se confirma que sin importar la longitud, la adición de fibra no provocó diferencias significativas en la porosidad del material entre las mezclas con 0,5%, 0,75% y 1,0% de fique. Este resultado es importante,

[320] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 383.
[321] ALI.Op. cit., p. 822.

ya que permite afirmar que los cambios en la resistencia a la compresión, tracción indirecta y en el módulo de rotura a flexión se dieron por la adición de la fibra. De haberse presentado el caso contrario en los resultados de porosidad, el cambio en las propiedades mecánicas en estudio se originaría por la variación de la porosidad.

Figura 47. Diagrama de Pareto Estandarizado para la porosidad interconectada de concreto con fibra de fique

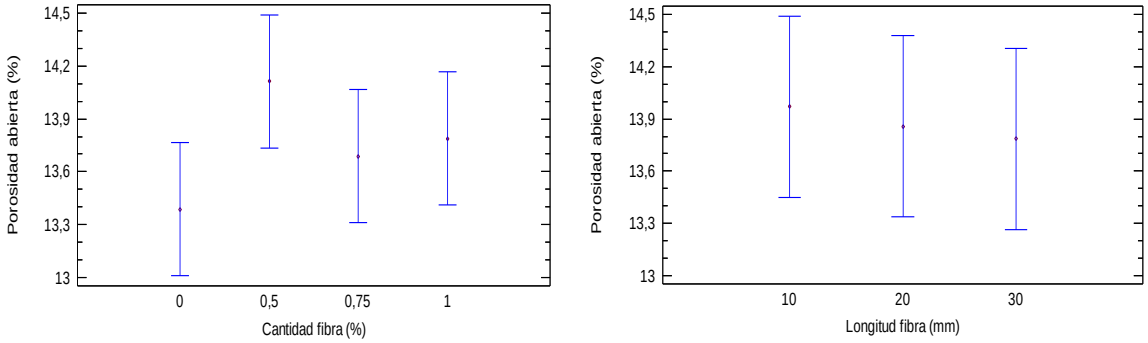


Lewis[322] y Cook[323] consideran que la incorporación de fibras naturales en una mezcla aumenta el contenido de vacíos debido al arrastre de aire adicional. Asimismo, el aumento en el contenido de vacíos también se debe a la compactación inadecuada de las mezclas, lo cual tiene relación con la cantidad de fibras que se puede agregar a una mezcla, situación que está limitada por el fenómeno de "formación de bolas" donde las fibras tienen una fuerte tendencia a entremezclarse y formar bolas de fibras que no se pueden separar fácilmente[324]. Este comportamiento depende principalmente de la naturaleza y el tipo de fibras, además, de la proporción en la mezcla. Como se ha expuesto en este reporte, solo en algunas probetas con adición de 1,0% de fibra de fique se observó el fenómeno de "formación de bolas" o aglomeración de fibras. De igual modo que Aziz[325], el

[322] LEWIS, Gladius; MIRIHAGALIA, Premalal. Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets. En: Magazine of Concrete Research. Junio, 1979, Vol. 31, No. 107, p. 106.
[323] COOK, D. J.; PAMA, R. P.; WEERASINGLE, H. L. S. D. Coir fibre reinforced cement as a low cost roofing material. En: Building and Environment. 1978, vol. 13, p. 196.
[324] AZIZ. Op. cit., p. 126.
[325] Ibid., p. 124.

autor considera que los factores que afectan las propiedades de concreto reforzado con fibra natural son: el tipo de fibra, geometría o forma de la fibra (longitud, diámetro, área de la sección transversal), condición superficial de la fibra, propiedades de la matriz, diseño de mezcla, método de mezclado, método de colocación y método de curado.

Figura 48. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la porosidad interconectada de concreto con fibra de fique



48a. Medias para cantidad de fibra

48b. Medias para longitud de fibra

Como los resultados anteriores corresponden a la *porosidad interconectada o abierta*, fue necesario verificar si se producía algún cambio en la porosidad del concreto reforzado con fibra. Para lo anterior se llevó a cabo la medición de la *porosidad total o porosidad* aplicando tinta negra y posteriormente ZnO sobre la muestra seca. Las imágenes de la Figura 49 muestran el resultado de la técnica de contraste aplicada a las muestras de concreto con adición de fibra, la cual es necesaria para realizar el cálculo de manera digital de la porosidad total en estado endurecido usando el software de análisis de imágenes *Image J*. Vale la pena aclarar que este ensayo se llevó a cabo como complemento del método gravimétrico empleado en la investigación.

Figura 49. Muestras preparadas con tinta y ZnO para análisis de porosidad total de concreto con fibra de fique



Figura 49a. Mezcla de concreto simple



Figura 49b. Mezcla de concreto con 0,5% de fibra de fique

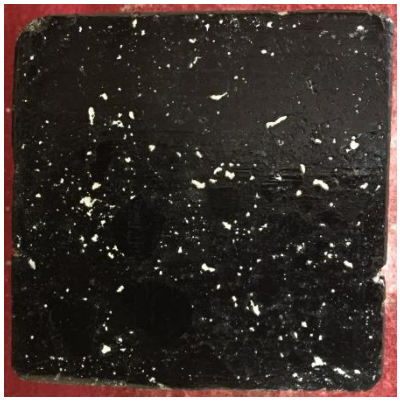


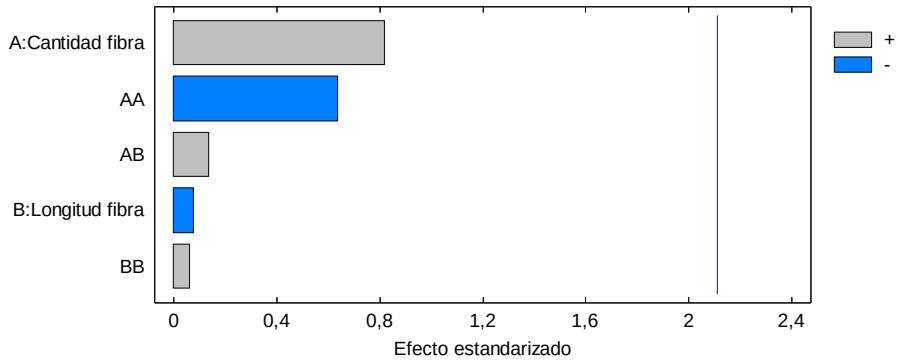
Figura 49c. Mezcla de concreto con 0,75% de fibra de fique



Figura 49d. Mezcla de concreto con 1,0% de fibra de fique

De igual modo, como ocurrió con la porosidad abierta, los resultados del análisis del porcentaje de área porosa de la sección transversal de los especímenes mostraron que la adición de fibra, en los porcentajes de reemplazo usados en la investigación, y las longitudes de fibra establecidas, no causaron aumento en la porosidad total del concreto fibro-reforzado. Con base en lo anterior, se confirma que el efecto producido sobre las propiedades mecánicas en estudio fue inducido por la adición de fibra de fique y no por cambios en la porosidad del material compuesto. Lo anterior se observa en el diagrama de pareto de la Figura 50, el cual muestra que la cantidad y la longitud de la fibra no tienen un efecto significativo sobre la porosidad del concreto reforzado con fibra de fique.

Figura 50. Diagrama de Pareto Estandarizado para el porcentaje de área de poros de concreto con fibra de fique



De igual manera que Ardanuy[326], de ésta investigación se deriva que las propiedades definitivas de compuestos cementicios reforzados con fibra de celulosa dependen del proceso de fabricación, además de los componentes de la fibra y la matriz. Para desarrollar propiedades mecánicas bien compensadas en compuestos cementicios fibro-reforzados se debe tener en cuenta lo siguiente: i) dispersión homogénea de las fibras en la matriz, ii) interacción equilibrada entre la matriz de cemento y las fibras, de tal forma que permita la extracción de la fibra, iii) baja porosidad de la matriz y iv) porcentaje optimizado de fibras, suficiente para reforzar el material al tiempo que permite una continuidad de la matriz.

Para finalizar esta sección, como el estudio requería conocer el efecto combinado de la adición de fibra y jugo de fique en la mezcla de concreto, fue necesario determinar el porcentaje de adición y la longitud de fibra con la cual iba a continuar la investigación. En este sentido, con base en el análisis estadístico de los resultados de resistencia a la compresión, tracción indirecta, módulo de rotura a flexión, densidad y porosidad, se determinó que dos cantidades de fibra tenían resultados semejantes, estas fueron 0,5% y 0,75%. Por otra parte, como la longitud de la fibra no presentó efecto significativo sobre las propiedades en estudio, se decidió mantener una longitud de fibra constante de 20 mm.

[326] ARDANUY. Op. Cit., p. 117.

2.3.2 Propiedades físico-mecánicas de concreto con jugo de fique. De la misma forma como se expusieron los resultados y la discusión de concreto con fibra de fique, se presentan en esta sección las características del concreto con aditivo natural (jugo de fique), iniciando con lo ocurrido en estado fresco y posteriormente en estado endurecido.

Fueron elaboradas 3 mezclas de concreto usando como aditivo jugo de fique y una con aditivo comercial, ésta última se fabricó con el fin de tener otra dosificación de control para fines de comparación, además de la mezcla de concreto simple. En la Tabla 7 se presentan las convenciones de estos concretos.

Tabla 7. Convención de concreto con jugo de fique

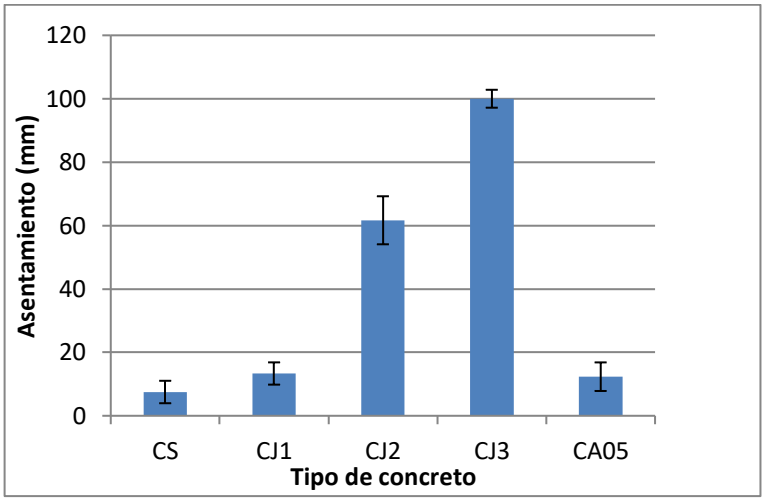
Tipo de concreto	Convención
Concreto simple	CS
CS + 1,0% de jugo de fique	CJ1
CS + 2,0% de jugo de fique	CJ2
CS + 3,0% de jugo de fique	CJ3
CS + 0,5% de aditivo comercial	CA05

Siguiendo con la metodología planteada, durante el proceso de fabricación del concreto se determinó el asentamiento, la densidad y el pH. A continuación, se presentan los resultados y la discusión para cada una de estas pruebas en estado fresco.

Para la evaluación del asentamiento se utilizó el cono de Abrams (ASTM C143). En la Figura 51 se muestra el comportamiento que tuvo el concreto con aditivo natural. En esta se observa qué al incrementar la cantidad de aditivo natural en la dosificación, el asentamiento aumentó, favoreciendo la manejabilidad de la mezcla. En este sentido, el asentamiento del concreto simple fue de 7,50±3,54 mm, para la

mezcla con jugo de fique de 1,0% fue de 13,33±3,51 mm, mientras que para 2,0% fue de 61,67±7,57 mm y para 3,0% de 100,00±2,83 mm; por otra parte, la mezcla con aditivo comercial logró un asentamiento de 12,33±4,51 mm. Estos resultados muestran que respecto al concreto simple se obtuvo un incremento en la manejabilidad de 77,78%, 722,22%, 1233,33% y 64,44% respectivamente para las mezclas con 1,0%, 2,0%, 3,0% de jugo de fique y 0,5% de aditivo comercial.

Figura 51. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con jugo de fique y aditivo comercial



La Figura 51 también permite establecer que las mezclas con 1,0% de jugo de fique y con aditivo comercial presentaron un comportamiento similar con diferencia estadística no significativa entre ellas. Esta mejora en la trabajabilidad se alcanza gracias al poder espumante del jugo de fique, el cual incluye burbujas de aire en la mezcla de concreto facilitando el movimiento de las partículas de agregado y de las distintas capas de la mezcla en estado fresco. En este sentido, Jaramillo Zapata[327] reporta que las propiedades reológicas de la pasta de cemento se afectan por el sistema de aire ocluido, ya que el surfactante es adsorbido en las partículas de cemento y superficie del agregado, además que existen interacciones en la interfase sólido-líquido-aire, haciendo que la masa de partículas de cemento ayude a

[327] JARAMILLO ZAPATA. Op. Cit., p. 93.

dispersar las burbujas de aire en la mezcla, reduciendo la tendencia a flotar hacia la superficie.

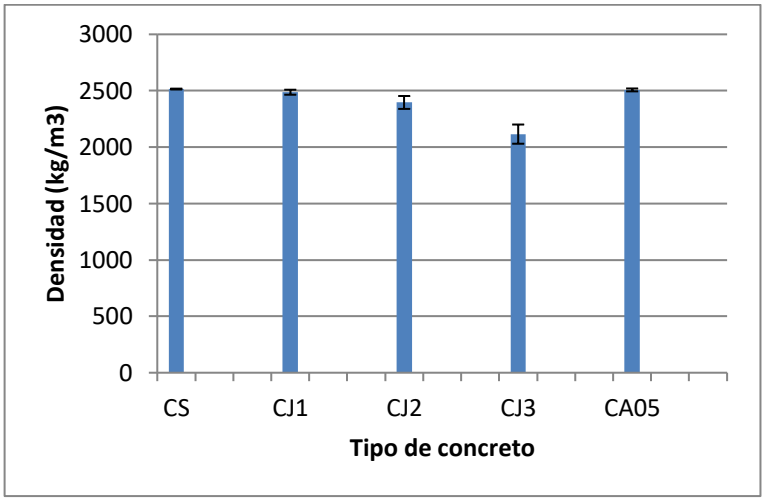
Con relación a la densidad en estado fresco, en el diagrama de columnas de la Figura 52, se observa que al aumentar la adición de jugo de fique en la mezcla de concreto la densidad del material disminuyó, mostrando que no hay diferencia significativa entre las mezclas de concreto simple, concreto con 1,0% de jugo de fique y concreto con aditivo comercial; sin embargo, el concreto simple presentó diferencia significativa con las mezclas al 2,0% y 3,0% de jugo de fique, siendo mayor para ésta última. Esta situación se atribuye a un mayor contenido de burbujas de aire atrapado en la matriz cementicia a medida que se incrementó la cantidad de jugo en las distintas mezclas de concreto. Esto debido a que el jugo de fique actúa como un surfactante, que al mezclarse con el agua de amasado disminuye la tensión superficial, permitiendo la formación de pequeñas burbujas de aire estables que permanecen durante el proceso de fabricación de la mezcla que posteriormente forman pequeños poros no coalescentes, disminuyendo la densidad de la mezcla y mejorando la durabilidad del concreto a agentes físicos y químicos[328]. También Ochoa y Jaramillo[329] reportaron que a mayor porcentaje de aditivo natural en la mezcla se obtienen menores densidades debido al incremento en la cantidad de aire que se obtiene.

Otra de las variables estudiadas, cuando se añadió el jugo de fique, fue el pH. Esta medición se realizó con el fin de determinar el posible efecto del aditivo natural sobre la basicidad del concreto, debido al carácter ácido del jugo de fique, y que como consecuencia se afectaran las propiedades físicas, químicas, mecánicas y de durabilidad del concreto en estudio. En la Figura 53, sobre el diagrama de columnas se aprecia un descenso en el pH del concreto a medida que aumenta la cantidad de

[328] OCHOA, Juan Carlos; JARAMILLO, Leyla. Uso del jugo de fique como aditivo orgánico en el hormigón. En: Scientia et Technica Año XIII. Septiembre, 2007, no. 36, p. 455.
[329] Ibid., p. 456.

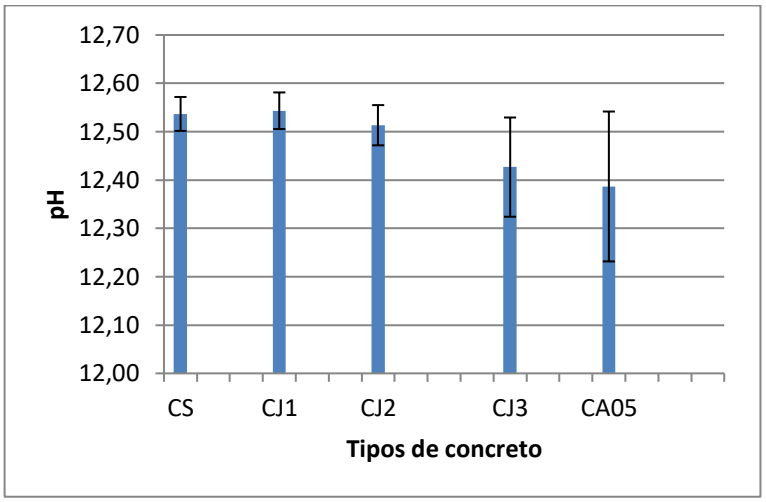
jugo en la mezcla; sin embargo, esta disminución no tuvo una diferencia estadística significativa entre la mezcla patrón y aquellas con aditivo natural al 1,0%, 2,0% y 3,0% e incluso la mezcla con aditivo comercial no mostró diferencia significativa. Cabe recordar que el aditivo comercial evidenció un pH más ácido que el jugo de fique; esta influencia se observa en el diagrama de columnas, siendo el pH de este concreto más bajo con relación a las otras mezclas. Con base en la situación expuesta, el jugo de fique se presenta como una alternativa que, según los resultados de la investigación, afecta en menor grado la basicidad del concreto en comparación con el aditivo comercial usado. El aspecto en mención vale la pena tenerlo en cuenta para estudios posteriores, ya que este aditivo plastificante es de uso común en la industria de la construcción.

Figura 52. Diagrama de columnas para densidad de concreto con jugo de fique y aditivo comercial en estado fresco



Para el concreto en estado endurecido se presentan los resultados de las pruebas mecánicas, observación en el MEB, evaluación de la Dsg, la porosidad abierta y la difracción de rayos X (DRX).

Figura 53. Diagrama de columnas para pH de concreto con jugo de fique y aditivo comercial en estado fresco

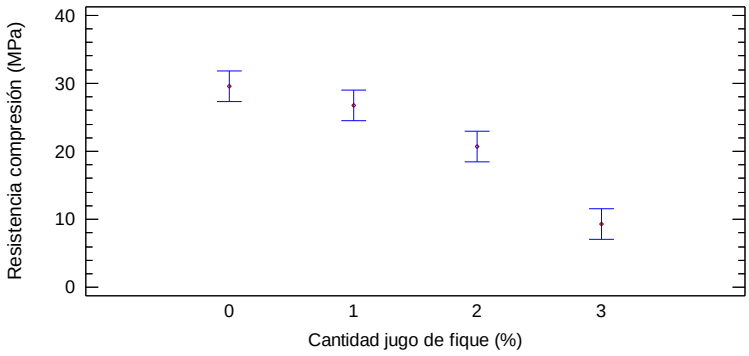


El análisis de las propiedades resultantes de las pruebas mecánicas se llevó a cabo de la misma forma como se hizo en la sección de concreto con fibra de fique, usando como herramienta el software estadístico *Statgraphics Centurion XV* para tal fin. En este sentido, en la Figura 54 se presentan los resultados estadísticos del ensayo de resistencia a la compresión en el día 28 para las mezclas de concreto con jugo de fique. En esta figura los valores sobre el eje X corresponden a la dosificación de jugo de fique en la mezcla, es decir, cero (0) pertenece a concreto simple, 1, 2 y 3 corresponden respectivamente a la mezcla con 1,0%, 2,0% y 3,0% de jugo.

En la Figura 54 se aprecia que, a medida que aumentó la cantidad de jugo en la mezcla de concreto, la resistencia a la compresión disminuyó, mostrando que no hubo grupos estadísticos homogéneos entre las distintas mezclas, lo cual indica que hubo diferencia significativa entre el concreto simple y las mezclas con aditivo natural; asimismo, entre las dosificaciones de concreto con jugo de fique, excepto entre el concreto simple y el adicionado con jugo al 1,0%. También cabe señalar, que la mezcla de concreto con 1,0% de jugo de fique mantuvo el 90,27% de la resistencia a la compresión respecto al concreto simple y ésta disminuyó dramáticamente a un 69,75% al aumentar el contenido de jugo al 2,0%; solo retuvo

el 31,39% para la mezcla con 3,0% de aditivo natural, obteniéndose con esta última dosificación un valor muy bajo de resistencia a la compresión para ser tenido en cuenta en cualquier mezcla que busque mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. Por su parte, la dosificación con el aditivo comercial retuvo el 89,83% de la resistencia original. Los resultados obtenidos, con relación a la mezclas con 1,0% de jugo de fique y 0,5% de aditivo comercial cumplen con la norma ASTM C260[330], en cuanto a que el valor de la resistencia a la compresión no debe ser menor a 90% respecto a concreto sin refuerzo. Jaramillo Zapata[331] reportó para igual relación a/c una disminución en la resistencia a la compresión superior a 25% para concretos con 0,5% y 1,0% de adición de jugo de fique.

Figura 54. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con jugo de fique

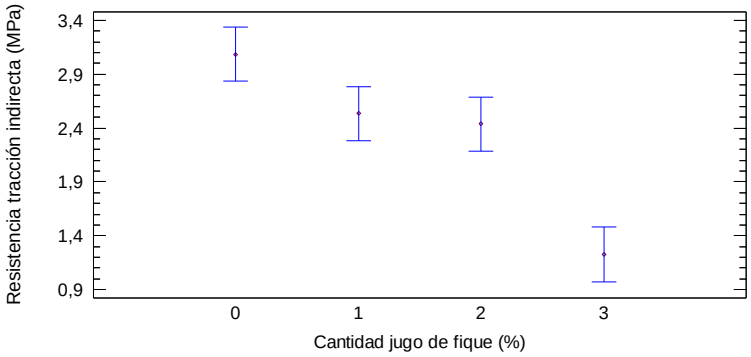


Por su parte, el análisis estadístico realizado para la resistencia a la tracción indirecta al día 28 de curado (Figura 55), evidenció que esta propiedad mecánica veía mermada su capacidad cuando fue incrementando la cantidad de jugo de fique en la mezcla de concreto. Además, presentó que no hay diferencia significativa entre las mezclas con 1,0% y 2,0% de jugo de fique. Por otro lado, entre el concreto simple y las mezclas con jugo de fique mostró diferencia estadística significativa muy marcada para la adición de 3,0% de jugo, ya que ésta dosificación tan solo retuvo

[330] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. p. 1-4. ASTM C260.
[331] JARAMILLO ZAPATA. Op. Cit., p. 101 y 123.

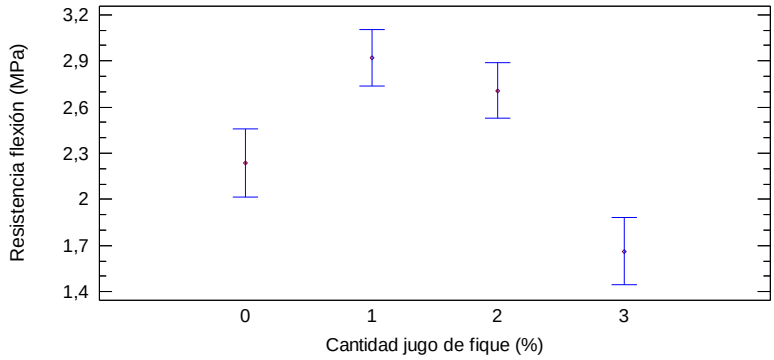
el 39,7% de la resistencia a la tracción respecto al concreto simple, mientras que la mezcla con 1,0% de jugo demostró mantener hasta un 82% y para 2,0% hasta un 79%.

Figura 55. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con jugo de fique



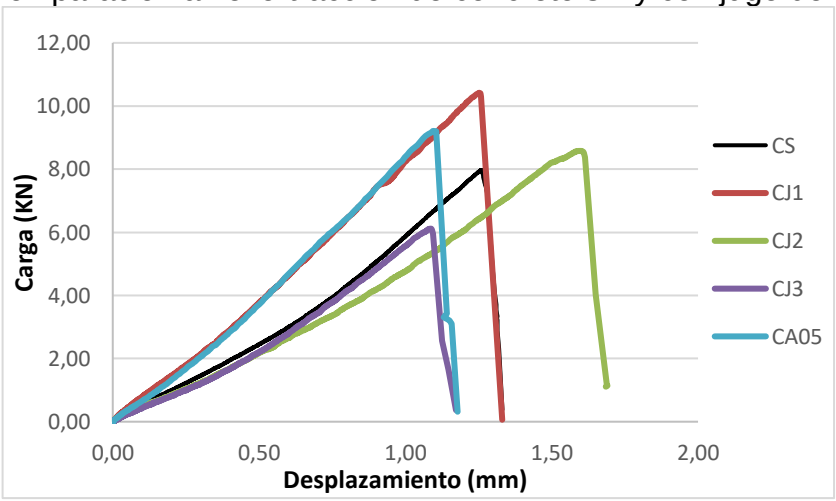
Por otro lado, los resultados del módulo de rotura a flexión (Figura 56), permitieron observar un comportamiento contrario a lo mostrado en las pruebas de compresión y tracción indirecta, es decir, la resistencia a la flexión aumentó a medida que se incrementó el contenido de jugo en la mezcla, excepto para la dosificación con 3,0% de jugo de fique. Este incremento fue de 30,7% y 25,8% para los concretos con 1,0% y 2,0% de jugo de fique respectivamente, revelando una diferencia estadística no significativa entre estas dos mezclas, pero significativa con el concreto simple y con 3,0% de jugo de fique. Por otro lado, la mezcla con aditivo comercial al 0,5% tuvo un incremento del 18,1%. Estos resultados obtenidos para las dosificaciones de aditivo comercial, 1,0% y 2,0% de jugo superan el requisito de la norma ASTM C260, en cuanto a que el valor de la resistencia a la flexión no debe ser menor a 90% del concreto patrón. Lo anterior, indica la posibilidad de usar el jugo de fique como aditivo aireante.

Figura 56. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con jugo de fique



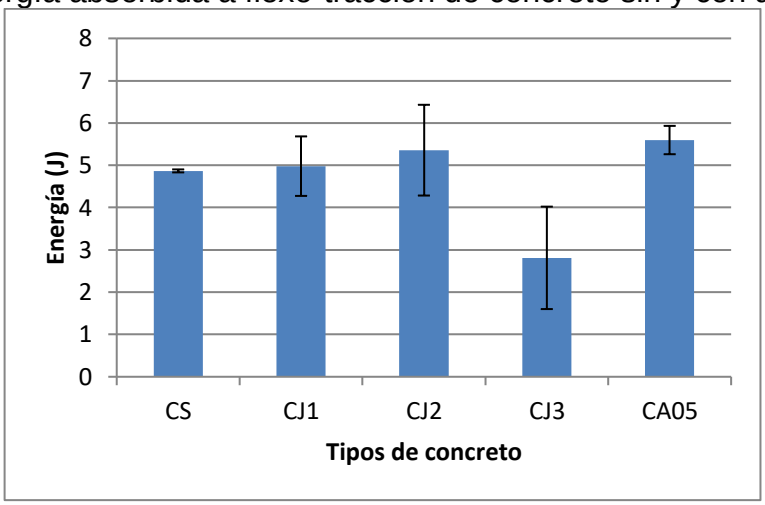
El comportamiento expuesto en el análisis estadístico para flexión se comprueba en la Figura 57, allí se aprecia que todas las mezclas presentaron rotura repentina. Además, las dosificaciones con 1,0% y 2,0% de jugo de fique, y con aditivo comercial, lograron mayor resistencia a la flexión respecto al concreto patrón.

Figura 57. Comparación a flexo-tracción de concreto sin y con jugo de fique



Por otro lado, en el diagrama de columnas de la Figura 58 se observa que la absorción de energía no presentó una diferencia significativa entre las diferentes mezclas, excepto aquella correspondiente a la adición de 3,0% de jugo de fique que fue la más baja.

Figura 58. Energía absorbida a flexo-tracción de concreto sin y con aditivo



A pesar, que el jugo de fique mejoró el asentamiento del concreto, hubo disminución en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y tracción indirecta, lo cual es producto del aumento en la porosidad total por la adición de jugo a la mezcla (Figura 59). De igual manera, fue reportado por Rehder[332], indicando que existe una dependencia bien establecida en la resistencia a la compresión y la porosidad. En contraste, cuando se adicionó jugo de fique en proporción de 1,0% y 2,0% aumentó el valor del módulo de rotura por flexión, así como con el aditivo comercial al 0,5%. Al someter las muestras a este tipo de carga ocurre una mejor distribución del esfuerzo en la matriz por causa de una compactación más deseable, que acomodó y unió más satisfactoriamente las partículas de agregado con la pasta de cemento aglutinante. Por otra parte, aunque la dosificación al 3,0% de jugo de fique produjo mayor asentamiento de la mezcla, esta cantidad de aditivo natural provocó exceso en la cantidad de poros en el concreto en estado endurecido, lo cual también causó disminución en el módulo de rotura a flexión. Lo anterior está de acuerdo con lo reportado por Rehder[333]. La variación en la porosidad puede observarse en la Figura 59. Allí se observa que la cantidad de poros incrementó en

[332] REHDER. Op. cit., p. 8.
[333] Ibid., p. 1.

la matriz cementicia a medida que aumentó el contenido de jugo de fique en la mezcla de concreto, especialmente para la dosificación con 3,0% de jugo. De forma similar fue reportado por Ochoa[334] en su estudio sobre el uso del jugo de fique como aditivo orgánico en el concreto.

Figura 59. MEB de la porosidad en concreto sin y con jugo de fique

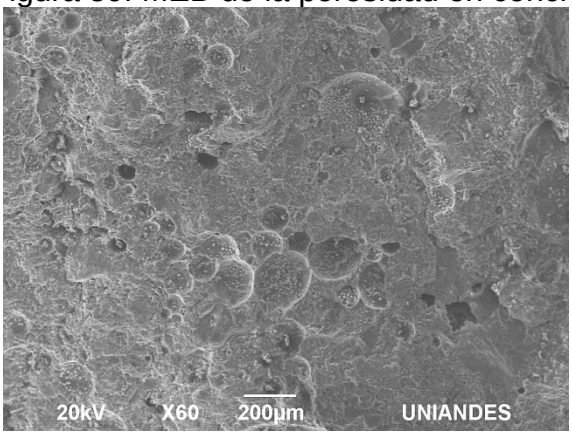


Figura 59a. concreto simple (60X)

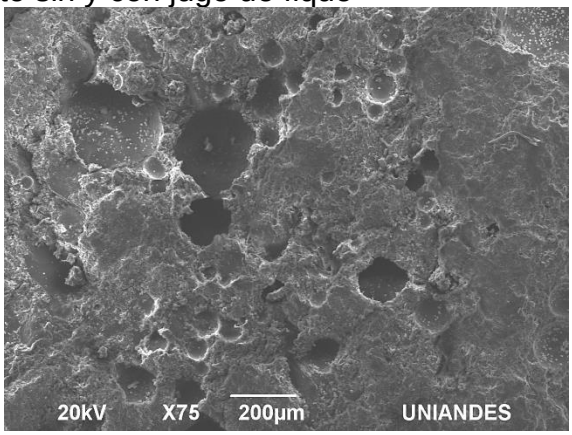


Figura 59b. Concreto con jugo de fique 1,0% (75X)

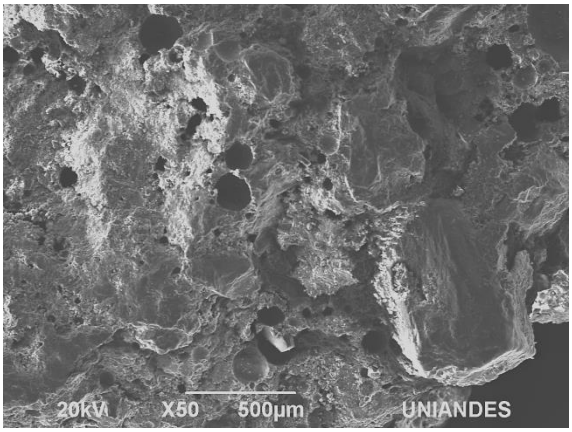


Figura 59c. Concreto con jugo de fique 2,0% (50X)

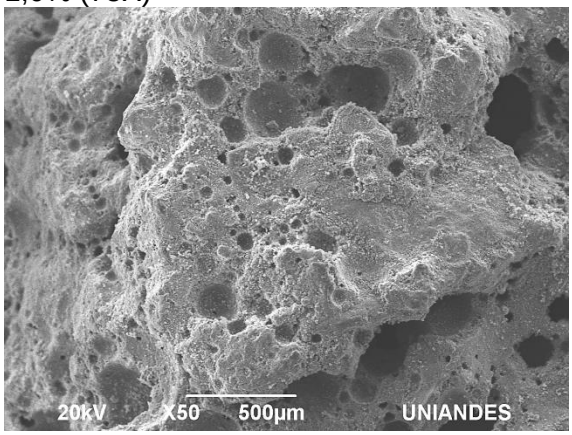


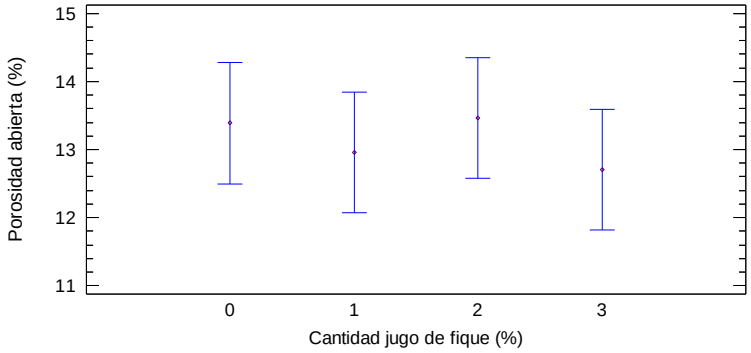
Figura 59d. Concreto con jugo de fique 3,0% (50X)

El cambio mostrado en la porosidad abierta también fue estudiado estadísticamente. Éste análisis mostró que no hay diferencia significativa entre la mezcla sin aditivo y aquellas con 1,0%, 2,0% y 3,0% de jugo de fique (Figura 60). Estos resultados estadísticos probablemente fueron ocasionados porque, mediante

[334] OCHOA. Op. Cit., p. 456.

el ensayo gravimétrico de porosidad, se establece la porosidad abierta y no la porosidad total. Con base en lo anterior y en las imágenes de MEB, se evidencia que al incrementar la cantidad de jugo en la mezcla se produjo mayor cantidad de poros; no obstante, esta porosidad producida no corresponde a porosidad interconectada, sino a una mayor cantidad de microporos y poros aislados que incementan la porosidad total, fenómeno que se observa en la imagen de MEB de la Figura 59d. Jaramillo Zapata[335] explicó que la formación de poros de aire dejan menor espacio para la formación de poros capilares, sin embargo, a partir de 3,0% se empieza a generar porosidad abierta que facilita el movimiento de agua y agentes químicos al interior del material.

Figura 60. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para porosidad interconectada de concreto con jugo de fique



Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se analizó el concreto con aditivo natural mediante análisis digital de imágenes. En la Figura 61 se presentan las muestras preparadas mediante la técnica de contraste con ZnO y tinta negra dónde se percibe el aumento en la porosidad. Ahora bien, el análisis de imágenes y la MEB permitieron determinar que el jugo de fique promovió la formación de mayor porosidad aislada en las mezclas de concreto cuando aumentó su contenido en la dosificación (Figura 62), efecto que fue provocado por el contenido de saponinas presentes en el aditivo natural y que producen la formación de burbujas en la mezcla

[335] JARAMILLO ZAPATA. Op. Cit., p. 104.

de jugo y concreto. Según se expuso en la sección 1.3.1. del capítulo 1, este efecto es causado por su capacidad como agente surfactante y tensoactivo[336].

Según el análisis digital de imágenes, la porosidad del concreto simple fue de 2,13±0,64%, mientras que para los concretos con jugo al 1,0%, 2,0% y 3,0%, y con aditivo comercial al 0,5%, fue respectivamente de 1,80±0,48%, 5,69±0,16%, 17,45±5,34% y 1,70±0,14%.

Figura 61. Muestras preparadas con tinta y ZnO para análisis de porosidad de concreto con jugo de fique



Figura 61a. Mezcla de concreto simple



Figura 61b. Mezcla de concreto con 1,0% de jugo de fique

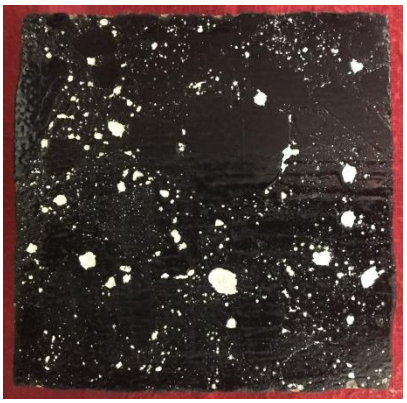


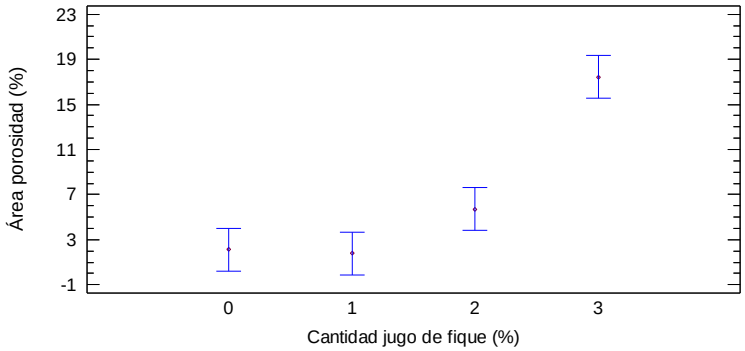
Figura 61c. Mezcla de concreto con 2,0% de jugo de fique



Figura 61d. Mezcla de concreto con 3,0% de jugo de fique

[336] LOZANO RIVAS. Op. cit., p. 5.

Figura 62. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para el porcentaje de área de poros de concreto con jugo de fique



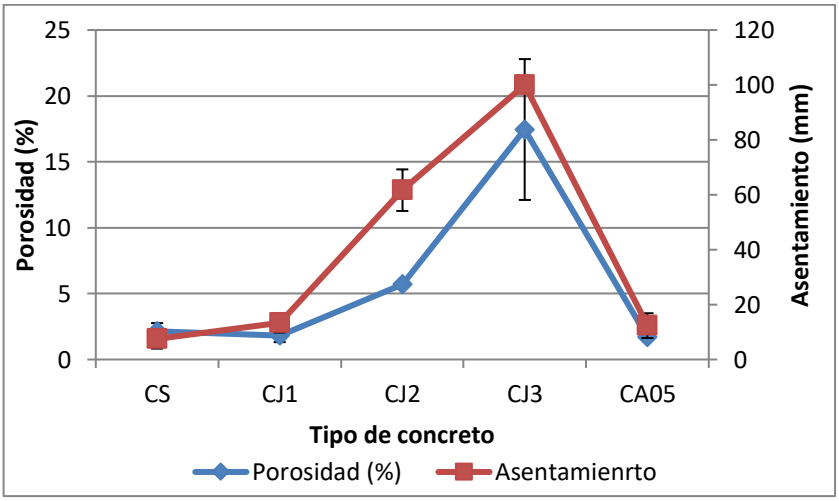
En la Figura 63 se compara el comportamiento mostrado en el asentamiento y la porosidad. Allí se observa que estos dos parámetros aumentaron con la adición de jugo de fique en el material cementicio. Con relación a la porosidad, según Ardanuy[337] la relación estequiométrica a/c es alrededor de 0,23, sin embargo, es necesario agregar más agua para mezlar los componentes. Este exceso de agua se evapora durante la etapa de curado, lo cual conduce a la formación de la red porosa en el material cementicio. Esta porosidad es una de las causas de la falta de durabilidad, ya que permite el acceso de agua que puede contener diferentes sustancias disueltas o de gases desde el exterior hacia el interior; además, para Hernandez Vicente[338] la porosidad afecta la matriz de la pasta de cemento y la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso, por lo que, a mayor porosidad más débil la ZTI entre el agregado grueso y el mortero.

Cuando el concreto fragua se forma una estructura de poros que define el comportamiento del concreto ante la agresividad del entorno. Esta porosidad es importante no sólo por el tamaño y distribución de los poros sino por su tortuosidad, la cual se define como una medida del grado de conectividad en el sistema de poros, que depende de los parámetros de diseño del material (relación a/c, tamaño del

[337] ARDANUY. Op. cit., p. 124.
[338] HERNANDEZ VICENTE. Op. cit., p. 86.

agregado, contenido de pasta y grado de compactación)[339]. También cabe señalar que la porosidad en el concreto puede proceder de diversas fuentes, tales como: aire incorporado, los agregados, el asentamiento, transformaciones químicas del gel y evaporación de agua que no hace parte de la hidratación. Según se ha expuesto, debido al uso de jugo de fique como aditivo, se produjeron poros no conectados que posiblemente protejan al concreto mejorando su impermeabilidad.

Figura 63. Comparación entre asentamiento y porosidad total de concreto en estado endurecido



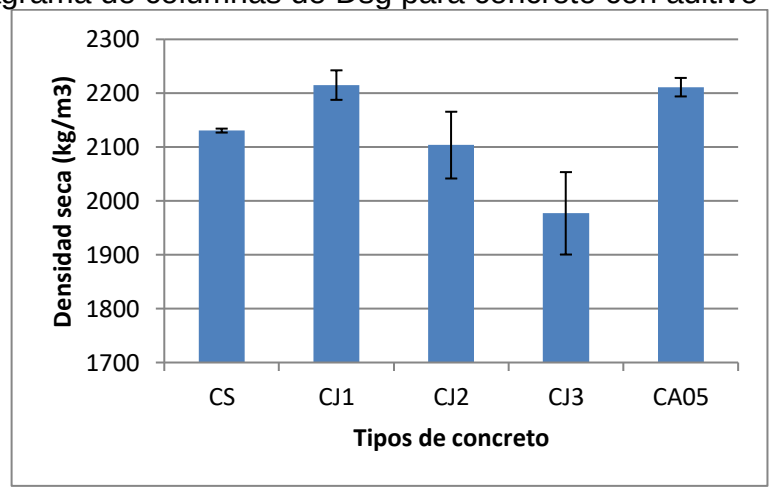
Como resultado de una mejor manejabilidad, la Dsg para la mezcla con 1,0% de jugo de fique aumentó significativamente respecto al concreto simple; asimismo ocurrió para la dosificación con aditivo comercial, según se aprecia en la Figura 64. También en la figura se distingue que al incrementar el jugo de fique en la mezcla la densidad decreció, mostrando que el concreto con 3,0% de jugo fue el más ligero de las mezclas con aditivo, exhibiendo una diferencia significativa respecto a las otras dosificaciones, lo cual fue ocasionado por un mayor contenido de poros; de manera similar Jaramillo Zapata[340] reportó disminución en la densidad de morteros respecto a la muestra control debido a la oclusión de aire causada por el jugo de

[339] REHDER. Op. cit., p. 1.
[340] JARAMILLO ZAPATA. Op. Cit., p. 102.

fique. Lo anterior está relacionado con el incremento de la porosidad total (poros capilares y porosidad aislada), que es la causante de la disminución en los resultados de resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión.

Para los análisis mediante DRX y MEB de esta sección, será usada la notación química típica del cemento, donde: C=CaO, S=SiO_2, F=Fe_2O_3, A=Al_2O_3, N=Na_2O, K=K_2O, H=H_2O y $\bar{S}$=SO_3. En la Tabla 8 se presenta la formulación química con su notación y abreviatura correspondiente. Allí el símbolo "-" indica una proporción estequiométrica inexacta. De igual forma se usarán los nombres de los compuestos alita, belita, tobermorita, portlandita y etringita.

Figura 64. Diagrama de columnas de Dsg para concreto con aditivo



Para Días Toledo Filho[341] la llamada reacción de hidratación (cemento+agua→hidratos+hidróxido de calcio+calor) es la combinación de reacciones de hidratación que toman lugar cuando la matriz cementicia está madurando. Las principales reacciones de hidratación del cemento Portland están basadas en los compuestos minerales del clinker. Estos pueden ser escritos en una forma simplificada así:

[341] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit., p. 4 y 5.

Tabla 8. Formulación química y abreviaturas de compuestos base cemento

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura
Silicato tricálcico (Alita)	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico (Belita)	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.\ Fe_2O_3$	C_4AF
Yeso	$Ca(SO_4).2H_2O$	$C\bar{S}H_2$
Silicato de calcio hidratado (Tobermorita)	$Ca_5Si_6O_{18}H_2$	C-S-H
Hidróxido de calcio (Portlandita)	$Ca(OH)_2$	CH
Aluminato ferrito trisulfato (Etringita)	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$	Aft
Aluminato ferrito monosulfato	$Ca_4Al_2O_6(SO_4).14H_2O$	Afm
Carbonato de calcio (Calcita)	$CaCO_3$	

$$C_3S + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH + calor \qquad \textit{Reacción (1)}$$

$$C_2S + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + CH + calor \qquad \textit{Reacción (2)}$$

$$C_3A + C\bar{S}H_2 + H \rightarrow Aft + calor \qquad \textit{Reacción (3)}$$

$$C_4AF + C\bar{S}H_2 + H \rightarrow Aft + CH + FH_3 + calor \qquad \textit{Reacción (4)}$$

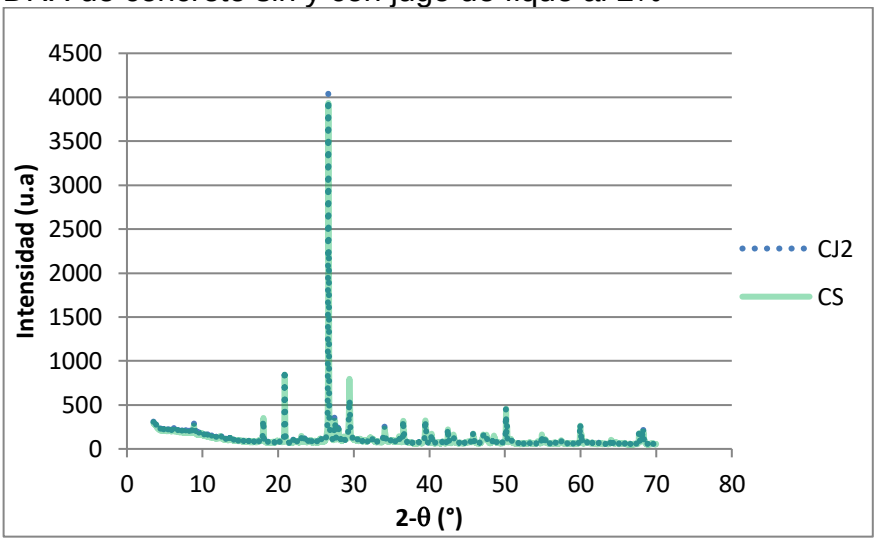
$$C_3A + Aft + H \rightarrow Afm + CH + FH_3 \qquad \textit{Reacción (5)}$$

$$C_4AF + Aft + H \rightarrow Afm + CH + FH_3 \qquad \textit{Reacción (6)}$$

En la Figura 65 se presenta la comparación entre el concreto patrón y el adicionado con 2,0% de jugo de fique. El análisis mediante DRX permitió establecer las fases cristalinas que se formaron durante el proceso de hidratación de concreto sin y con aditivos (natural y comercial). Este análisis evidenció que la adición de jugo de fique formó los mismos productos de hidratación con relación a la mezcla no adicionada, sin revelar cambios en las fases presentes. El estudio de los difractogramas estableció la presencia de tobermorita (27°), etringita (21°) y portlandita (34° y 18°). También mostró una cantidad alta de SiO_2, el cual puede ser relacionado con la

formación de tobermorita y por la presencia de partículas de cuarzo provenientes del agregado fino, correspondiente ambos al pico principal en 27°. Los productos cristalinos observados son congruentes con los reportados en la literatura sobre hidratación de cemento por Ramirez Arellanes[342], Tagnit Hamou[343] y Ramli[344].

Figura 65. DRX de concreto sin y con jugo de fique al 2%



Por otra parte, para los porcentajes de adición de jugo de fique en la matriz de concreto, el contenido de azúcares presente en este aditivo natural no causó retardo ni inhibición del fraguado del cemento. Lo anterior se evidencia en la Figura 65 en donde la formación de portlandita no se vió afectada por el aditivo.

Las fases cristalinas halladas por medio de DRX, para concreto sin y con aditivo natural, se muestran en las imágenes de MEB de la Figura 66. Allí se observa la presencia de productos de las reacciones de hidratación como son: hidróxido de calcio-portlandita (Figura 66a), silicato de calcio hidratado-tobermorita (Figura 66b y 66c), que es el responsable de la resistencia, y trisulfoaluminato de calcio

[342] RAMÍREZ ARELLANES. Op. cit., p. 333.
[343] TAGNIT HAMOU, Arezki; SARIC-CORIC, Mladenka; RIVARD, Patrice. Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates Junio 17 de 2004. Revista Cement and Concrete Research, 35, p. 101. (Recuperado el 7 mayo 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.
[344] RAMLI. Op. cit., p. 142.

hidratado-etringita, que se forma por la reacción de aluminato tricálcico con yeso y agua como se mostró en la reacción 3. La identificación de estos cristales fue posible con mayor facilidad en las dosificaciones de 2,0% y 3,0% de jugo de fique a través de su estructura porosa de las superficies fracturadas de concreto endurecido.

Figura 66. MEB de fases en concreto

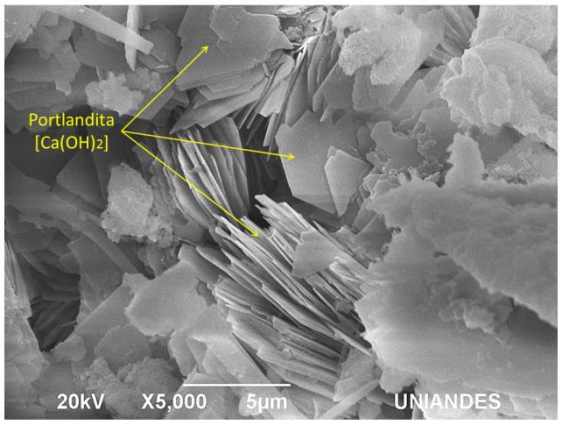


Figura 66a. MEB de portlandita en concreto. 5000X

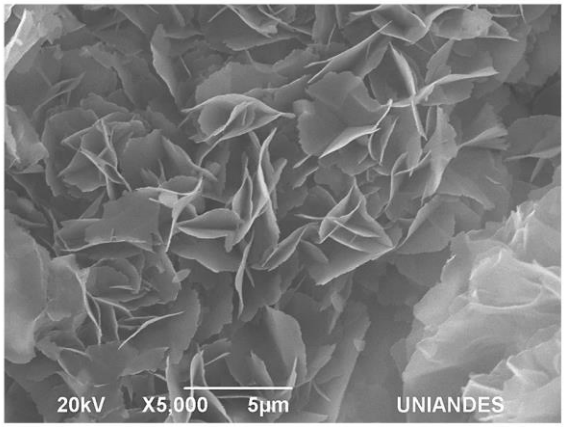


Figura 66b. MEB de tobermorita en concreto. 5000X

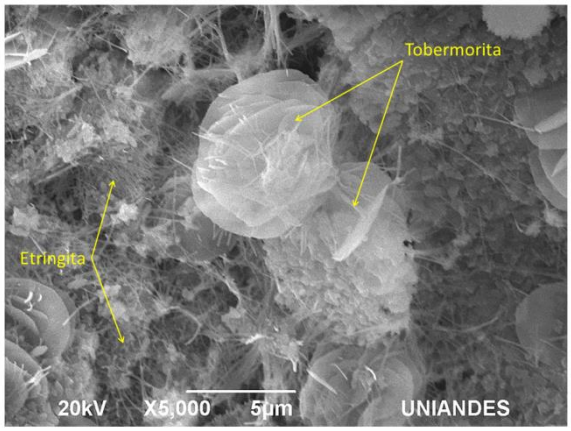


Figura 66c. MEB de etringita y tobermorita en el concreto. 5000X

En la Figura 66a pueden verse las placas de portlandita, que exhiben una forma hexagonal típica. Por su parte, la Figura 66b muestra haces finos de gel de tobermorita con forma de lámina, y en la Figura 66c se observan además agujas de etringita. A medida que la pasta de cemento endurecida madura, el relleno de los

espacios vacíos elimina los cristales bien formados que se muestran en las figuras, dando una microestructura resultante que parece indescriptible[345]. La identificación, mediante MEB, de las fases cristalinas presentes en la microestructura de la pasta es invaluable para el conocimiento de las características morfológicas y composición de los constituyentes[346] y su relación con el comportamiento mecánico del material compuesto. En este sentido, la presencia de tobermorita detectada en los difractogramas y en las imágenes MEB, comprueba la razón de la alta resistencia a la compresión, superior al 90% respecto al concreto patrón, como es el caso para el concreto adicionado con 1,0% de jugo, y a la flexión, observada para las dosificaciones al 1,0% y 2,0% de aditivo natural. Es por lo anterior, con base en el análisis de resultados de las pruebas mecánicas y físicas de los concretos adicionados, que para la siguiente etapa de esta investigación fueron seleccionadas las dosificaciones de 1,0% y 2,0% de aditivo natural en el material cementicio.

2.3.3 Propiedades físico-mecánicas de concreto con jugo y fibra de fique sin y con tratamiento. Con base en los resultados expuestos en las secciones anteriores, se realizaron 4 mezclas que combinaron las proporciones de fibra de fique de 0,5% y 0,75%, y de jugo de fique 1,0% y 2,0%. Teniendo en cuenta los resultados de las 4 mezclas mencionadas, se elaboraron 3 dosificaciones más, como se indica en la Tabla 9 de convenciones para las mezclas de esta sección.

En primer lugar, la Figura 67 muestra el comportamiento del asentamiento presentado por las mezclas con fibra y jugo de fique. Se observa que aunque las dosificaciones contenían fibra, las mezclas fueron significativamente más manejables que el concreto simple, excepto la mezcla CF75J1, sin embargo, su asentamiento fue mayor al mostrado en las mezclas de concreto con fibra de fique sin aditivo natural o comercial. El bajo asentamiento de la mezcla CF75J1 se debió,

[345] STUTZMAN, Paul E., et. al. Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography. En: Materials Science of Concrete. 2001, vol. 59, no. 72, p. 60.
[346] Ibid., p. 61.

probablemente, a que esta fue la dosificación con mayor contenido de fibra y menor cantidad de jugo, lo cual no produjo condiciones favorables para la mezcla. Sin embargo, los resultados mostrados confirmaron que, a pesar de contar con fibras, el jugo de fique aporta manejabilidad a las mezclas debido a su poder espumante, según se analizó en la sección anterior, formando burbujas que permiten el deslizamiento de las capas de concreto fresco.

Tabla 9. Convención de concreto con fibra y jugo de fique

Tipo de concreto	Convención
Concreto simple	CS
CS + 0,5% de fibra y 1,0 % de jugo	CF5J1
CS + 0,5% de fibra y 2,0% de jugo	CF5J2
CS + 0,75% de fibra y 1,0% de jugo	CF75J1
CS + 0,75% de fibra y 2,0% de jugo	CF75J2
CS + fibra y 0,5% de aditivo comercial	CFA
CS + fibra tratada	CFT
CS + jugo de fique + fibra tratada	CJFT

La combinación de fibra y jugo de fique en la mezcla produjo un concreto con menor densidad en estado fresco, con diferencia significativa respecto al concreto simple en todas las combinaciones, excepto para la mezcla con 0,5% de fibra y 1,0% de jugo (CF5J1). Estos resultados se muestran en el diagrama de columnas de la Figura 68. La reducción en esta propiedad posiblemente obedeció a la baja densidad de la fibra natural y a la generación de burbujas de aire por causa del aditivo natural.

Figura 67. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra y jugo de fique

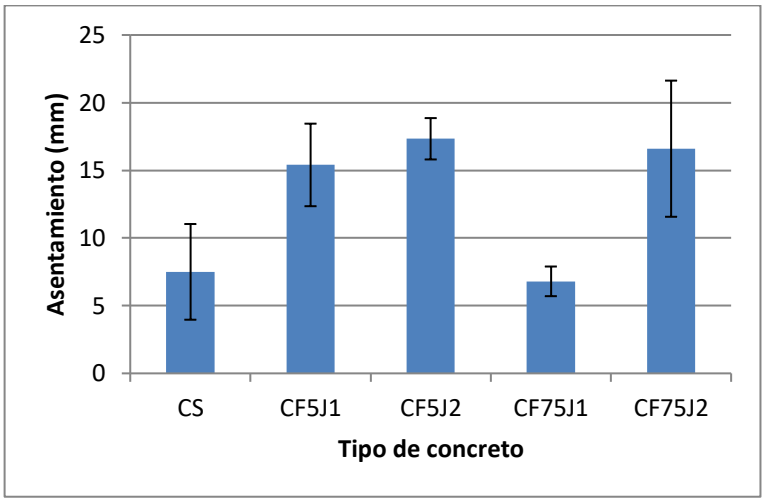
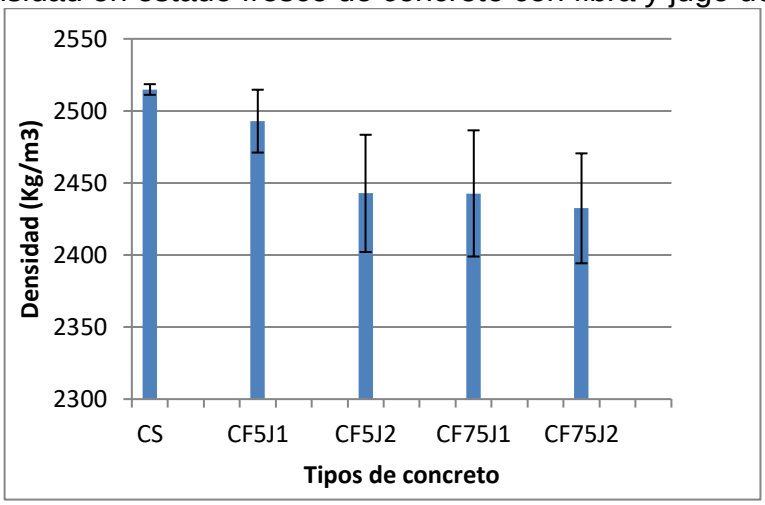


Figura 68. Densidad en estado fresco de concreto con fibra y jugo de fique



El tratamiento estadístico en esta parte de la investigación involucró el efecto que produjo la combinación de fibra y jugo de fique en la misma mezcla de concreto. Éste se llevó a cabo de la misma manera que en las secciones anteriores, haciendo énfasis en la diferencia estadística mostrada por los factores en estudio: cantidad de fibra y de jugo de fique. Es así, que la Figura 69 presenta los resultados estadísticos del ensayo de resistencia a la compresión. El diagrama de pareto estableció que la combinación de fibra y jugo tuvo un efecto negativo y significativo

sobre la propiedad mecánica. Este escenario también se evidencia en la Figura 70, donde se observa que al añadir la fibra, la resistencia a la compresión disminuyó significativamente respecto al concreto simple, aunque no hubo diferencia significativa entre las adiciones de 0,5% y 0,75%. Asimismo, al aumentar la cantidad de jugo de fique los valores de resistencia a la compresión fueron menores, evidenciando diferencia significativa entre las distintas mezclas al incluir el aditivo natural. En conclusión, la combinación de fibra y jugo de fique redujo la resistencia a la compresión del material cementicio, reteniendo 67,42%, 54,44%, 67,10% y 47,05% respectivamente para las mezclas CF5J1, CF5J2, CF75J1 y CF75J2.

Figura 69. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la compresión de concreto con fibra y jugo de fique

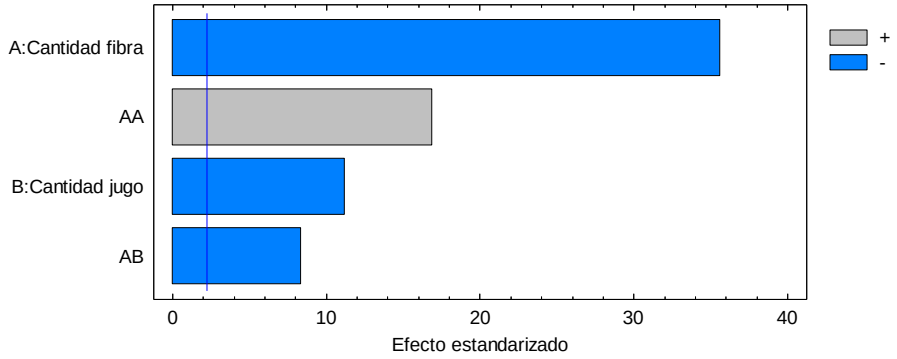
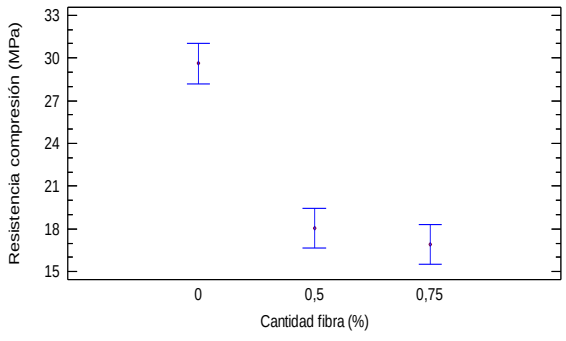
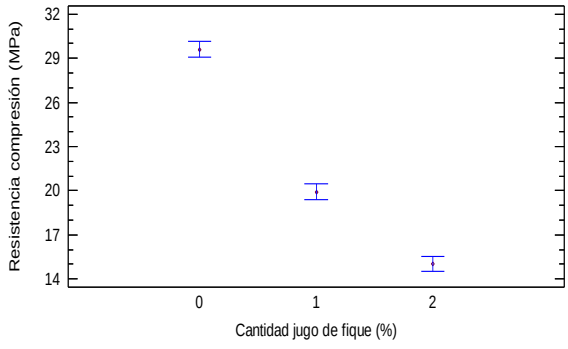


Figura 70. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la compresión de concreto con fibra y jugo de fique



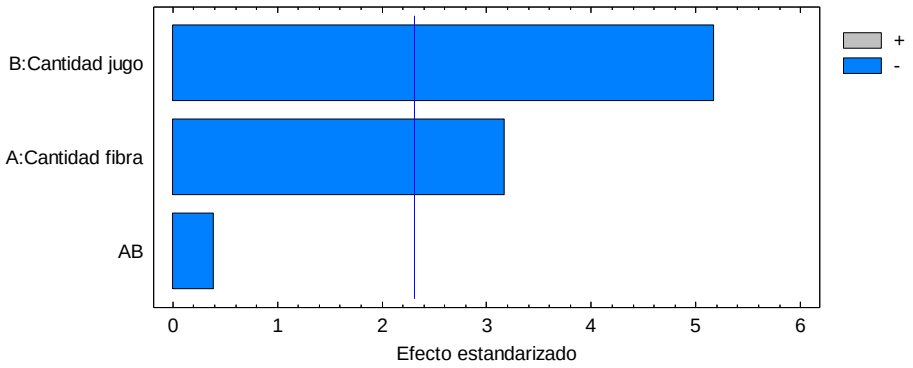
70a. Medias para cantidad de fibra



70b. Medias para cantidad de jugo

Por otra parte, en la Figura 71 se presenta el diagrama de pareto para los resultados de resistencia a la tracción indirecta; se estableció que los factores individuales en estudio y la mezcla de fibra y jugo tuvieron un efecto negativo sobre esta propiedad. Igualmente, los resultados mostrados en la Figura 72 evidencian que la adición de fibra y jugo de fique provocó la disminución de la resistencia a la tracción comparado con el concreto simple. Se muestra que no hubo diferencia significativa entre la adición de 0,5% y 0,75% de fibra de fique, tal como ocurrió con la resistencia a la compresión, la diferencia significativa se presentó con las mezclas de 1,0% y 2,0% de jugo de fique. En definitiva, la combinación de fibra y jugo de fique redujo la resistencia a la tracción indirecta en el material compuesto, reteniendo 81,66%, 72,64%, 76,42% y 65,93% respectivamente para las mezclas CF5J1, CF5J2, CF75J1 y CF75J2.

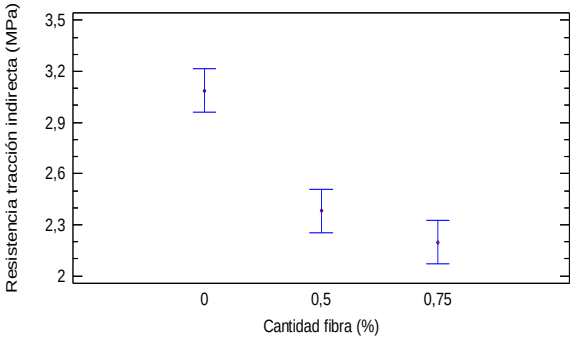
Figura 71. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra y jugo de fique



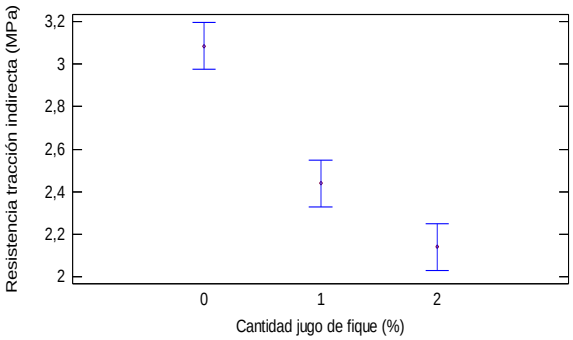
La disminución en la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta en el material endurecido se debe a una combinación de efectos, es decir, por la presencia simultánea de sitios para alojamiento de la fibra y poros causados por el jugo. Los primeros son el resultado de la incorporación de fibras, los cuales como se expuso en la sección 2.3.1, no proporcionaron beneficios en estas 2 propiedades mecánicas. Con relación al segundo aspecto, la incorporación de burbujas de aire

provenientes del jugo, reduce la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta por el aumento en la porosidad de la matriz cementicia, según se analizó en la sección 2.3.2. Con estos resultados se demuestra la dependencia bien establecida que existe entre la resistencia y la porosidad[347], incluyendo en esta última los sitios para el alojamiento de la fibra y aquellos espacios que se generan en la zona de transición interfacial entre la matriz y la fibra.

Figura 72. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra y jugo de fique



72a. Medias para cantidad de fibra



72b. Medias para cantidad de jugo

En relación con los resultados de resistencia a la flexión, el análisis estadístico mostró que los factores individuales tuvieron un efecto positivo sobre el módulo de rotura, así como se expuso en los análisis de las secciones anteriores. El diagrama de pareto de la Figura 73, evidenció que la combinación de fibra y jugo afectó negativamente la resistencia del concreto a flexo-tracción de manera significativa. Este efecto probablemente fue provocado por la mezcla de concreto CF75J2, la cual tuvo una disminución de 8,52% en el módulo de rotura respecto al concreto simple, posiblemente por su alta cantidad de fibra y de jugo de fique que generaron mayor cantidad de espacios en la ZTI y de poros en la mezcla. Caso contrario ocurrió con las dosificaciones CF5J1, CF5J2 y CF75J1 que exhibieron ganancias de 11,47%,

[347] REHDER. Op. cit., p. 8.

5,34% y 6,80%, respectivamente. Estos resultados fueron comprobados mediante el análisis del diagrama de medias de la Figura 74, en el cual se demuestra que el módulo de rotura a flexión fue mayor para la combinación de 0,5% de fibra y 1,0% de jugo. Lo hallado posiblemente fue derivado de un mejor asentamiento por causa del aditivo natural, por lo tanto, mayor facilidad para la compactación del concreto fibro-reforzado. Por otro lado, los resultados confirmaron que la fibra actúa efectivamente ante el esfuerzo de flexo-tracción durante la aplicación de la carga, antes y después de la rotura, obteniendo mayor energía absorbida en el ensayo.

Figura 73. Diagrama de Pareto Estandarizado de resistencia a la flexión de concreto con fibra y jugo de fique

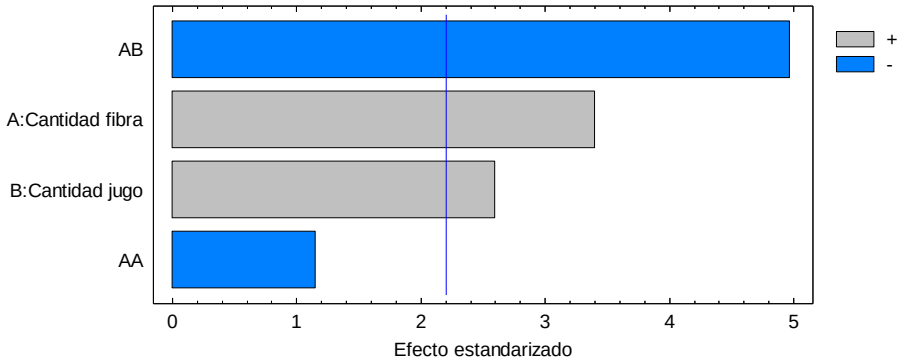
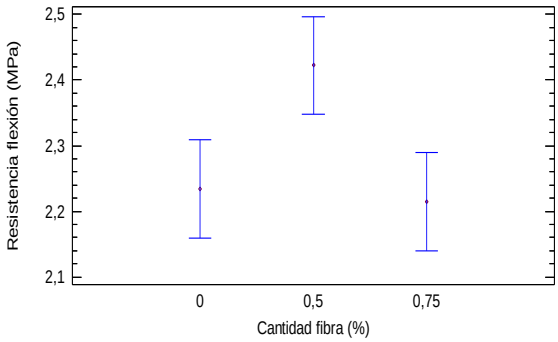
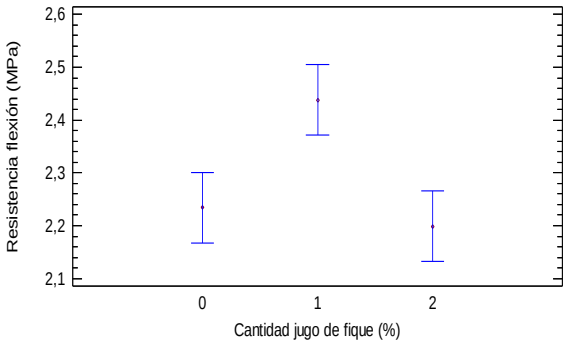


Figura 74. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para resistencia a la flexión de concreto con fibra y jugo de fique



74a. Medias para cantidad de fibra



74b. Medias para longitud de fibra

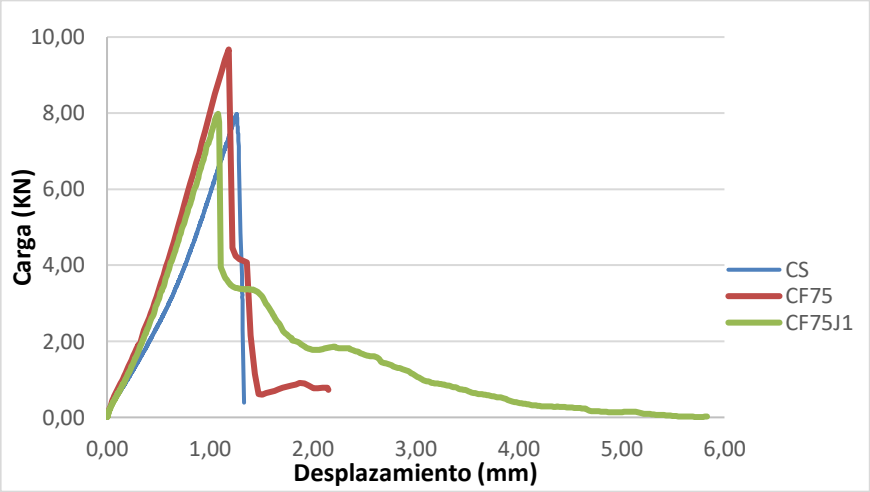
Como se expuso en la sección 2.3.1, las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. Según Rehder[348] el efecto de las fibras en la respuesta post-agrietamiento sobresale en mezclas con mayor porosidad. La estructura de los poros (incluido el volumen total, los tamaños característicos, el espaciado de los poros en tres dimensiones y la tortuosidad) y su interacción con las fibras influyó en la resistencia a la propagación de la grieta en el material[349]. Como se demostró en esta disertación doctoral, el incremento en la porosidad aislada, debido a la adición del jugo en el concreto reforzado, probablemente contribuyó a la distribución de la carga aplicada antes de la rotura. También, durante y después de la fractura hizo que la grieta rodeara los poros favoreciendo la acción de las fibras y por lo tanto se produjera la absorción de energía. Lo expuesto se muestra en la Figura 75, la cual corresponde a la comparación entre el concreto simple y uno reforzado con fibra sin jugo y otro combinando fibra y jugo de fique. Allí se observa que el concreto combinado con fibra y aditivo natural mantuvo la carga aplicada en un mayor rango de deformación, lo cual se vió reflejado en un incremento en la absorción de energía del material (Figura 76).

Se puede observar en las Figuras 75 y 76 que la contribución de las fibras mejoró la capacidad residual del concreto adicionado con fibra y jugo de fique con el incremento de la porosidad en el material, debido a la adición de jugo de fique. Estos resultados proporcionan una visión de los efectos sinérgicos de las fibras y del volumen poroso sobre el rendimiento a la fractura del material compuesto. La explicación de este comportamiento se basa en el hecho de que al aumentar la porosidad, en la matriz cementicia habrá un mayor número de poros, lo que reduce la separación entre los mismos, por lo tanto, la posibilidad estadística de que las fibras ayuden a salvar estos poros y a transferir la carga a través de ellos es mayor

[348] Ibid., p. 1.
[349] Ibid., p. 2.

cuando los poros están más cerca unos de otros, haciendo a las fibras más efectivas en porosidades más altas en lo referente a la capacidad de carga[350]. En definitiva, la incorporación de fibras en las dosificaciones de concreto con jugo de fique dio como resultado que el material, una vez se producía el agrietamiento, mostrara una caída entre el 50% y 60% de la carga máxima, momento en el que la fibra actuaba, permitiendo el decaimiento paulatino del esfuerzo y tolerando una extensión mayor de la grieta, y demostrando que la influencia de las fibras post-agrietamiento es más prominente cuando aumenta la extensión de la grieta.

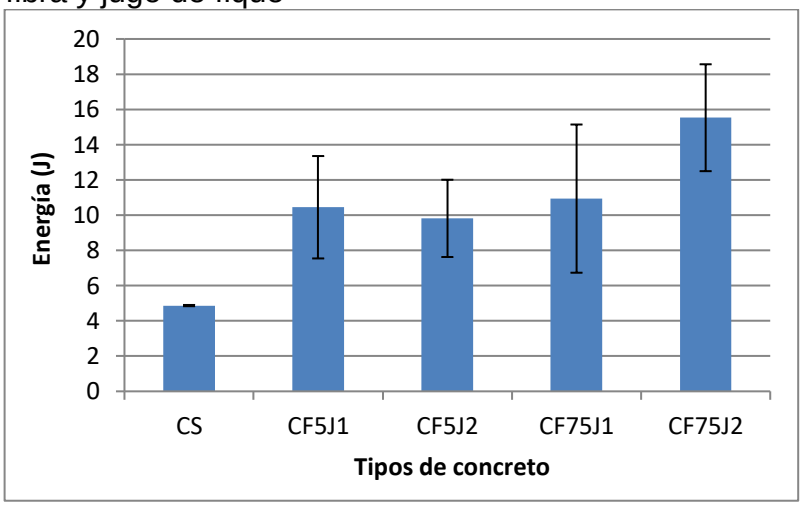
Figura 75. Comparación a flexo-tracción de CS, CF75 y CF75J1



Con relación a la energía absorbida, en la Figura 76 se evidencia que al aumentar la adición de fibra y jugo de fique, la energía creció respecto al concreto simple, sin embargo, no hubo diferencia significativa entre los concretos adicionados, excepto entre CF5J2 y CF75J2. Las distintas mezclas de concreto con fibra y jugo de fique mostraron mayor energía, este comportamiento se dio porque al producirse la rotura, la fibra continuó actuando y mantuvo unidas las partes presentando mayor deformación, como se explicó anteriormente.

[350] Ibid., p. 9.

Figura 76. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto con fibra y jugo de fique



Como se expuso en la sección 2.3.1, correspondiente a concreto reforzado con fibra sin aditivo natural, la observación en el MEB de los distintos concretos evidenció que las fibras presentaron adherencia con la matriz (Figura 77a). Igualmente, mostraron una separación con la matriz del orden de micras (Figuras 77a y 77b), evidenciando falta de adhesión en el material reforzado. Ambos fenómenos aportaron al incremento significativo en la absorción de energía respecto al concreto simple, sin embargo, no fue significativa la diferencia entre ellas. Como era de esperarse, el mecanismo predominante posterior al agrietamiento, fue el de extracción de la fibra de la matriz cementicia.

Referente a la densidad (Figura 78), los resultados confirmaron que con la adición de fibra y jugo de fique, la Dsg aumentó en comparación con el concreto simple, excepto para la mezcla CF75J2. Este resultado comprobó que la dosificación menos favorable fue aquella con el mayor contenido de fibra y de jugo de fique, esto debido a la alta porosidad presentada. Por otra parte, las mezclas CF5J2 y CF75J1 presentaron una Dsg estadísticamente semejante, sobresaliendo con la mayor densidad la dosificación con 0,5% de fibra y 1,0% de jugo. Cabe resaltar, que la mejora obtenida en la densidad concuerda con el asentamiento logrado, lo anterior,

producto de una mejor compactación, que derivó en una mejora significativa en el módulo de rotura a flexión para esta dosificación.

Figura 77. MEB de concreto con fibra y jugo de fique



Figura 77a. Fibra de fique en la matriz de concreto con jugo (100X)

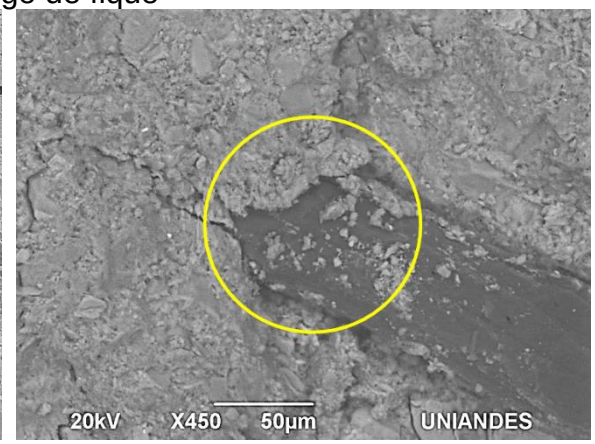
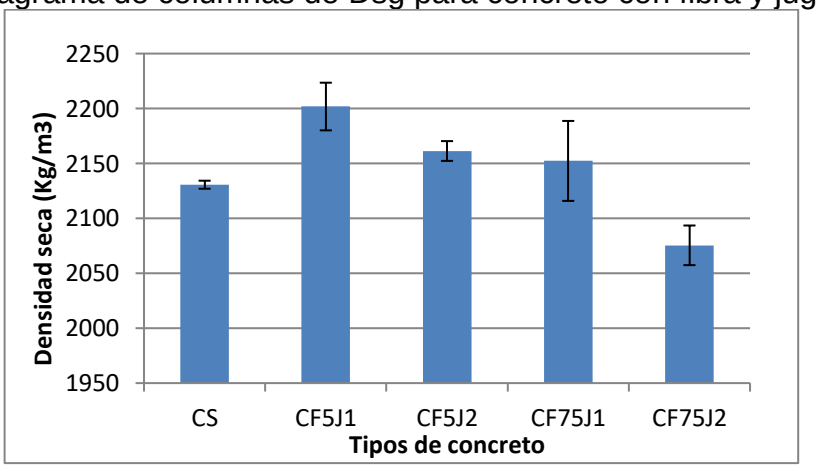


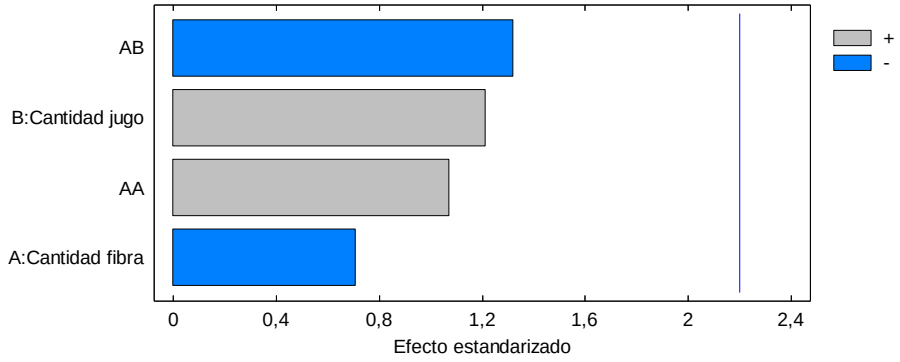
Figura 77b. Fibra de fique en la matriz de concreto con jugo (450X)

Figura 78. Diagrama de columnas de Dsg para concreto con fibra y jugo de fique



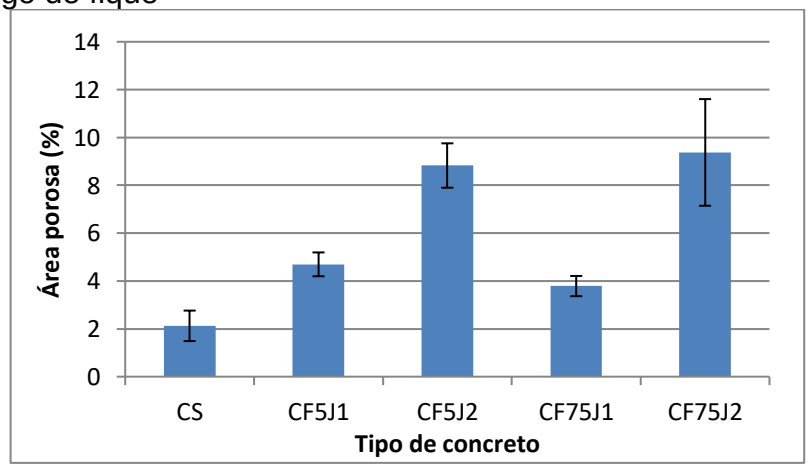
Ahora bien, con relación a la porosidad abierta (Figura 79), así como ocurrió para los concretos adicionados con fibra y jugo de forma independiente, el análisis estadístico mostró que la adición de fibra y jugo de manera combinada no tuvo un efecto significativo sobre las propiedades en estudio.

Figura 79. Diagrama de Pareto Estandarizado para la porosidad interconectada de concreto con fibra y jugo de fique



En contraste, los resultados del cálculo de porosidad total, mediante análisis digital de imágenes, confirmó que la adición de jugo de fique produjo mayor porosidad aislada y por lo tanto mayor área porosa en los concretos estudiados. Por otra parte, también reafirmó que la adición de fibra de fique no afectó la porosidad del material fibro-reforzado. En la Figura 80 se observa que las dosificaciones con contenido de jugo de 2,0% presentaron la mayor porosidad total con diferencia significativa respecto a las otras mezclas. Estos resultados ratificaron que la combinación de factores, fibra y jugo, más favorable para continuar la investigación fue aquella con 0,5% de fibra y 1,0% de jugo, denominada CF5J1.

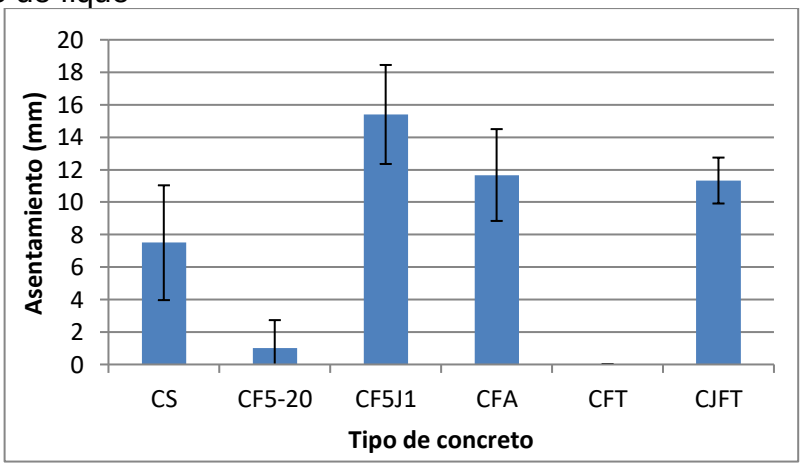
Figura 80. Diagrama de columnas para el porcentaje de área de poros de concreto con fibra y jugo de fique



Con base en los resultados expuestos, la mezcla con 0,5% de fibra y 1,0% de jugo fue la dosificación con la cual se llevaron a cabo las 3 últimas mezclas, estas fueron: concreto con fibra tratada (CFT), concreto con jugo y fibra tratada (CJFT) y con fines de comparación, una mezcla de concreto con fibra al 0,5% de aditivo comercial (CFA). Las mezclas con fibra tratada se elaboraron con el fin de determinar el efecto de la fibra con tratamiento sobre las propiedades físicas y mecánicas en estudio para su probable uso en aplicaciones de concreto reforzado con fibra. A continuación se presentan los resultados comparativos entre las mezclas de CS, CF5-20, CF5J1, CFA, CFT y CJFT.

En el diagrama de barras de la Figura 81, se observa que el asentamiento aumentó con la adición combinada de fibra y jugo, mostrando diferencia significativa entre la mezcla CF5J1 y el concreto simple. El concreto CFT exhibió el mismo comportamiento que los concretos adicionados con fibra sin tratamiento y sin aditivo, al mostrar asentamiento nulo, para el caso de CF5-20 fue de 1,0 mm. Además se observa que no hay diferencia estadística significativa entre las mezclas CF5J1, CFA y CJFT.

Figura 81. Diagrama de columnas para el asentamiento de concreto con fibra tratada y jugo de fique



Con relación a las propiedades mecánicas, las Figuras 82, 83 y 84 presentan la comparación de los resultados obtenidos. En este sentido, la resistencia a la compresión (Figura 82) disminuyó en todos los casos respecto al CS, excepto para la mezcla CFA, conservando el 65,32% y 64,92% para las dosificaciones de fibra tratada CFT y CJFT, respectivamente, evidenciando una diferencia significativa con el CS y con CF5-20. En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta (Figura 83), el análisis exhibió que solo la mezcla CFA tuvo un comportamiento similar al concreto simple, las demás mezclas con jugo y fibra sin y con tratamiento presentaron una disminución relevante en esta propiedad mecánica de 22,45% y 22,07% para los concretos CFT y CJFT. En resumen, la adición de fibras con tratamiento no contribuyó al aumento de la resistencia a la compresión ni a la tracción indirecta, posiblemente debido a la falta de adherencia entre la fibra y la matriz. La explicación sobre el comportamiento mostrado a compresión y tracción indirecta se hizo en las secciones anteriores (2.3.1 y 2.3.2).

Figura 82. Diagrama de columnas para resistencia a la compresión de concreto con fibra tratada y jugo de fique

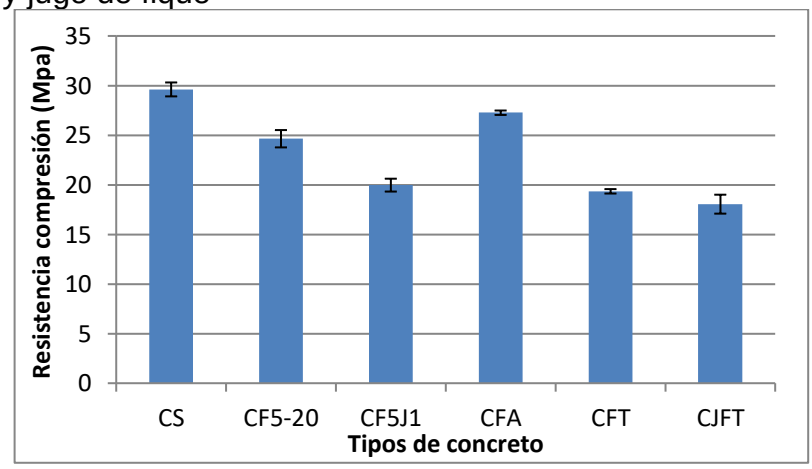
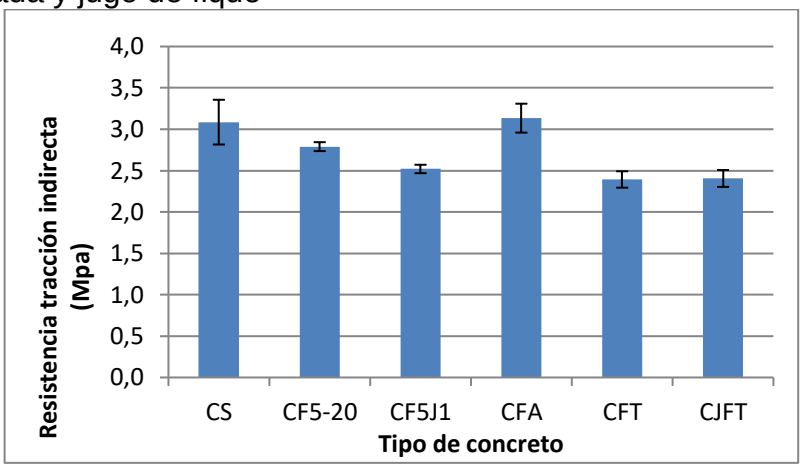


Figura 83. Diagrama de columnas para resistencia a la tracción indirecta de concreto con fibra tratada y jugo de fique



En contraste, el módulo de rotura a flexión (Figura 84) y la absorción de energía ante la carga de flexo-tracción (Figura 85) evidenciaron aumento en sus magnitudes respecto al concreto simple. En la resistencia a la flexión, la diferencia fue significativa, exhibiendo que la mezcla CFT presentó el mayor módulo de rotura con ganancia de 34,41% respecto al CS, le siguieron CFA con 23,06% y CJFT con 13,03%. En cuanto a la energía absorbida, también hubo un incremento relevante respecto al CS, sin embargo, entre las mezclas adicionadas no se presentó diferencia estadística significativa, excepto con CF5-20. También destaca la dosificación CFT exhibiendo absorción de energía que sobresale respecto a las demás. La mayor absorción de energía y módulo de rotura a flexión más alto, por parte de la mezcla CFT, pudo ser causado porque en esta dosificación no se usó ningún tipo de aditivo, como se evidenció con la prueba de asentamiento, lo que produjo en el material compuesto menor cantidad de burbujas de aire, y como reportó Rehder[351], los beneficios de tener una porosidad baja supera el efecto sinérgico producido entre la fibra y un alto volumen de poros.

[351] Ibid., p. 9.

Figura 84. Diagrama de columnas para el módulo de rotura a flexión de concreto con fibra tratada y jugo de fique

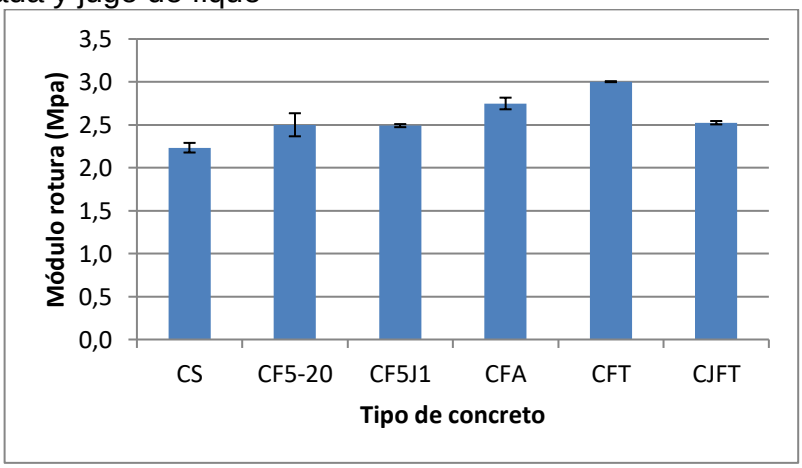
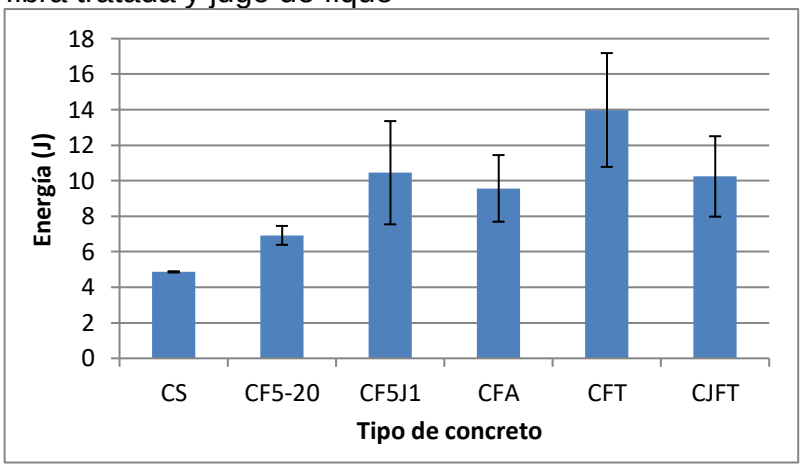


Figura 85. Diagrama de columnas para energía absorbida a flexo-tracción de concreto con fibra tratada y jugo de fique

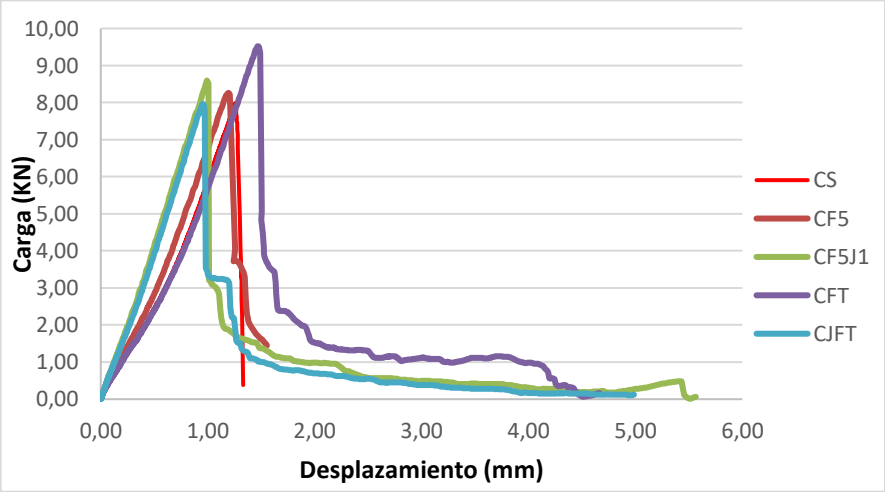


Para Osorio Saraz[352] el cambio en las propiedades mecánicas del concreto con la fibra tratada puede atribuirse a las características mecánicas de la misma, la cual con el tratamiento aumentó su resistencia pero perdió rigidez al presentar un módulo de elasticidad menor. Esto se ve reflejado en las Figuras 85 y 86 al comparar CF5-20 con CFT, las cuales corresponden a la misma dosificación, es decir, concreto con fibra de fique al 0,5%, con la diferencia que CFT contiene la fibra tratada con NaOH y que reveló un diferencia significativa entre ellas. Por su parte, entre las

[352] OSORIO SARAZ. Op. cit., p. 71.

mezclas CF5J1 y CJFT (ambas son concreto con fibra al 0,5% y jugo al 1,0%) no hubo diferencia en el comportamiento, a pesar de contener CJFT la fibra modificada. Los resultados obtenidos refuerzan lo expuesto en la sección 2.3.1 referente a que la fibra aumenta la ductilidad del material compuesto. Igualmente, la explicación sobre el comportamiento del material fibro-reforzado mostrado en la Figura 86 se hizo en la sección 2.3.1. A manera de información adicional, en el Anexo C se presenta la comparación porcentual entre el concreto simple y las mezclas de concreto adicionado con jugo y fibra de fique sin y con tratamiento superficial.

Figura 86. Comparación a flexo-tracción de CS, CF5, CF5J1, CFT y CJFT



Además del efecto producido por la adición de fibra y jugo de fique al concreto, en este apartado, se debe agregar la influencia que tuvo la fibra tratada en el material compuesto. En este sentido, para Savastano Jr[353] el aumento en la ductilidad es el resultado de una unión interfacial optimizada entre la fibra limpia y la matriz, debido a la baja incidencia de los componentes no celulósicos removidos. Como se explicó en el capítulo 1, la degradación dual de hemicelulosa y lignina de la fibra natural aumenta el grado de separación interfibrilar, lo cual favorece el reordenamiento de las microfibrillas de celulosa a lo largo de la dirección de deformación. En

[353] SAVASTANO. Jr. Op. cit., p. 315.

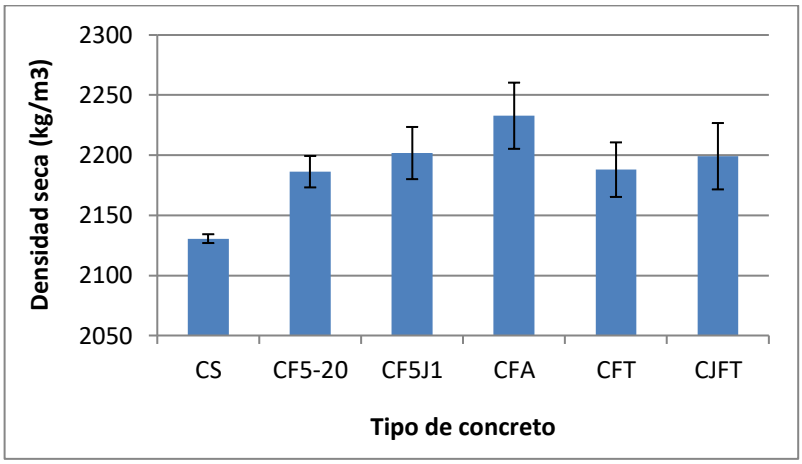
consecuencia, la elongación post-agrietamiento posiblemente sea producto del grado mejorado de orientación molecular de las microfibrillas[354].

Por otra parte e igualmente reportado por Monsalve[355] y Alves Fidelis[356], la modificación de la superficie de las fibras permite, no solo reducir su capacidad de absorción de agua, sino también acondicionar su superficie, aumentando su rugosidad y proporcionando una mejor adhesión con la matriz del compuesto. Sin embargo, el material compuesto falló por la ZTI debido a una débil conexión entre la matriz y la fibra tratada, lo cual demuestra que el tratamiento químico superficial no fue completamente efectivo para mejorar la adhesión entre la fibra y la matriz, lo cual fue explicado de la misma manera por Carvalho[357]. Vale la pena añadir que, según Lopattananon[358] y Alves Fidelis[359] ,el tratamiento de la fibra no solo modifica su rugosidad, también el área de superficie efectiva, lo que probablemente aporta a la resistencia en la unión interfacial entre el refuerzo de fibra y la matriz, produciendo mayor eficiencia en la transferencia del esfuerzo en la interfase.

La Figura 87 muestra que la densidad en estado endurecido aumentó significativamente respecto al CS, sin embargo, entre las distintas mezclas adicionadas no hubo diferencia significativa. Estos resultados respaldan lo expuesto para el módulo de rotura y la energía absorbida a flexión, en donde, esta propiedad mecánica aumentó con la adición de jugo y fibra sin o con tratamiento.

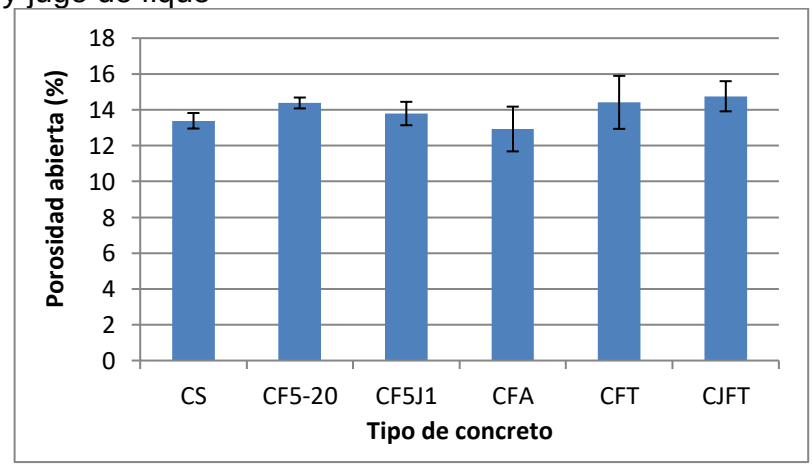
[354] LOPATTANANON. Op. cit., p. 1982.
[355] MONSALVE. Op. cit. p. 67.
[356] ALVES FIDELIS. Op. cit. p. 7.
[357] CARVALHO. Op. cit. p. 1151 y 1152.
[358] LOPATTANANON. Op. cit., p. 1982.
[359] ALVES FIDELIS. Op. cit. p. 7.

Figura 87. Diagrama de columnas para Dsg de concreto con fibra tratada y jugo de fique



Teniendo en cuenta los análisis presentados en las secciones anteriores, la adición de jugo y fibra sin o con tratamiento no afectó la porosidad interconectada. El diagrama de columnas de la figura 88 evidenció que no hubo diferencia significativa entre las diferentes mezclas y el CS. Estos resultados confirman las hipótesis planteadas en las secciones anteriores, referentes a que la fibra no contribuyó a la formación de porosidad abierta, igualmente ocurrió con el jugo de fique, el cual formó porosidad aislada y no interconectada.

Figura 88. Diagrama de columnas para porosidad interconectada de concreto con fibra tratada y jugo de fique



Por último, un aspecto importante a tratar, fue el estado de la fibra en la solución de poro de la matriz cementicia. Por lo tanto, en primer lugar es necesario entender el proceso de degradación de la fibra en la matriz cementicia. En este sentido, se sabe que la causa principal de la alcalinidad en el concreto es la siguiente reacción química correspondiente al hidróxido de calcio (pH~13)[360]:

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{+2} + 2OH^- \qquad \textit{Reacción (7)}$$

En la matriz cementicia, la reacción (7) es la causante de la fijación de Ca^{+2} sobre la superficie de la fibra[361]. Este fenómeno se conoce como mineralización, el cual es el responsable de la degradación o daño que sufre la fibra natural en el ambiente alcalino del concreto. La mineralización causa fragilidad de la fibra y ocurre por la migración de los productos de hidratación hacia el lumen, las paredes y los intersticios de las fibras[362]. Ardanuy[363] también afirma que probablemente el proceso de mineralización se deba a una reacción química del polímero de celulosa con el ácido isosacarínico, causado por el elevado medio alcalino de la matriz. Una fracción de este ácido reacciona con los iones de calcio dando lugar a una sal precipitada. Este proceso cataliza nuevas transformaciones del polímero de celulosa en ácido y la formación de más sales lo que lleva a un debilitamiento de las fibras de celulosa.

La descomposición en un medio alcalino de la celulosa, que es la principal unidad estructural de la fibra, así como también de la hemicelulosa, se puede presentar de acuerdo a dos diferentes mecanismos: el desfibramiento y la hidrólisis alcalina[364]. El primero sucede cuando la celulosa constituida por cadenas lineales de glucosa

[360] WEI, Jianqiang; MAYER, Christian. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. Noviembre 17 de 2013. Revista Science Direct. 289, 511-523. (Recuperado el 20 agosto 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/apsusc.
[361] PRASAD KUNDU. Op. cit. p. 846 y 847.
[362] ARDANUY. Op. cit. P. 124.
[363] Ibid., p. 125.
[364] JUAREZ. Op. cit. p. 88.

se disuelve cuando reacciona con el ion OH^-, produciendo CH_2OH^- el cual se desprende de la cadena molecular. De esta manera el desfibramiento es continuo durante la exposición al medio alcalino[365]. Con relación al segundo mecanismo, este origina la división de las cadenas moleculares, y se combina con el mecanismo anterior, causando la división de la cadena molecular, lo que origina la reducción del grado de polimerización de fibra[366] y la exposición de las unidades fundamentales[367]. De igual manera, la lignina, que es la matriz que une las microceldas de celulosa, se fragmenta fácilmente en un medio alcalino. Según Juarez Alvarado[368], la descomposición química de la lignina y la hemicelulosa es la principal causa del deterioro por fragilización de la fibra en el concreto.

La alcalinidad de la solución de poro de la matriz cementicia disuelve en primera instancia la lignina y la hemicelulosa, rompiendo la unión de las microceldas individuales, las cuales absorben el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento, perdiendo así la fibra su flexibilidad y fragmentándose en pequeñas unidades longitudinales perdiendo su capacidad de reforzar al concreto[369]. Para Wei[370], la lignina, la hemicelulosa y la pectina actúan como barreras químicas y físicas para la penetración de iones Ca dentro de la pared celular y en la lámina media de las fibras minimizando la mineralización de la fibra, por lo tanto, la durabilidad de la fibra natural en la matriz cementicia depende del contenido de estos tres componentes.

Es así, que en la Figura 89 se presentan micrografías de la MEB del estado de la fibra de fique sin y con tratamiento superficial que estuvo en la matriz de concreto aproximadamente un año en condiciones bajo techo en el laboratorio. La razón de trabajar con estas condiciones fue evitar la influencia del medio ambiente exterior y

[365] JUAREZ ALVARADO. Op. cit. p. 13.
[366] DIAS TOLEDO FILHO. Op. cit. p. 127.
[367] JUAREZ ALVARADO. Op. cit. p. 13.
[368] Ibid., p. 88.
[369] Ibid., p. 88.
[370] WEI. Op. cit., p. 6.

así poder establecer el efecto de la solución de poro en el concreto. La examinación mostró residuos de pasta de cemento sobre el fique (Figuras 89a-89d), es decir, se produjo mineralización por depositación de iones Ca sobre la superficie de la fibra. Además, estos depósitos demuestran que hubo cierto grado de adherencia entre la fibra y la matriz cementicia, como se expuso en las secciones previas. Por otra parte, a pesar del tiempo en que se llevó a cabo la examinación y la mineralización evidenciada, el análisis reveló que la fibra conservaba su aspecto original sin demostrar signos de degradación por separación de las fibrillas individuales de celulosa (Figuras 89a-89d).

Figura 89. MEB de fibra sin y con tratamiento superficial extraída del concreto

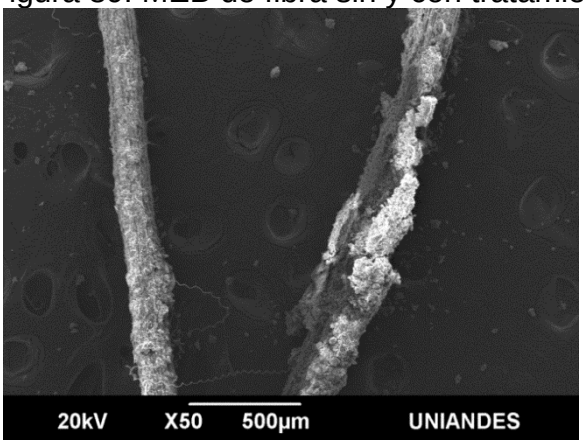


Figura 89a. Fibra de fique con tratamiento y presencia de depósitos de pasta (50X)

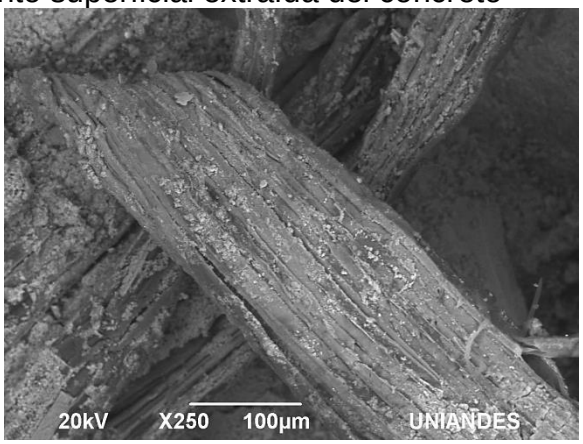


Figura 89b. Fibra de fique sin tratamiento y presencia de depósitos de pasta (250X)

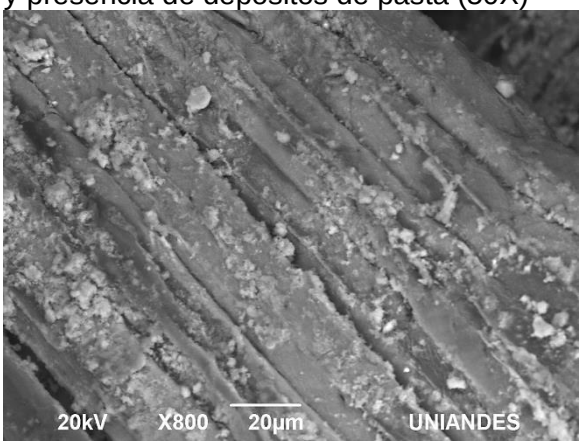


Figura 89c. Fibra de fique sin tratamiento y presencia de depósitos de pasta (800X)

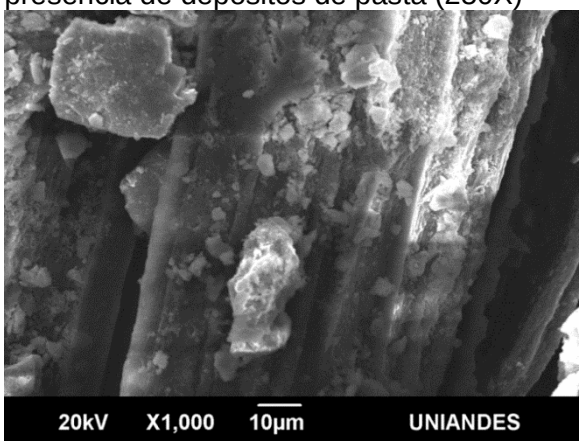
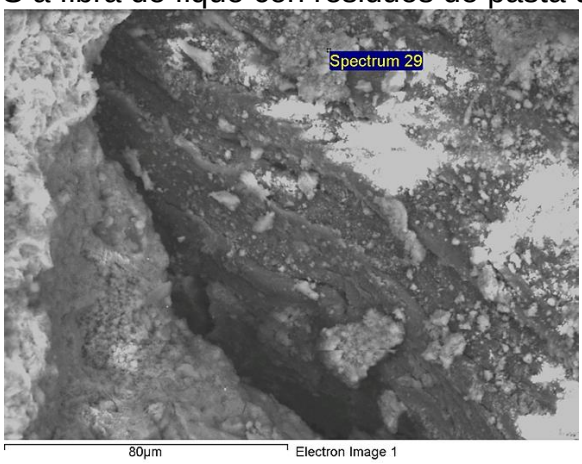


Figura 89d. Fibra de fique sin tratamiento y presencia de depósitos de pasta (1000X)

Con el fin de comprobar la presencia de los depósitos de pasta de cemento sobre la superficie de la fibra, se llevó a cabo un análisis EDS (Figura 90), el cual mostró la presencia de los elementos químicos C, O, Ca, Si, Fe y Al. En la Tabla 10 se presentan los resultados del análisis, evidenciando una alta concentración de Ca, lo cual confirma que las células de la fibra estan mineralizadas debido a la fijación de Ca^{+2} sobre su superficie y como se expuso anteriormente, no se observaron signos de deterioro de la fibra. Resultados similares fueron reportados por De Andrade Silva[371] en compuestos base cemento reforzados con fibra de sisal para la elaboración de tejas. Por otra parte, el análisis de EDS reveló una alta concentración de C, lo cual posiblemente se deba a la existencia de calcita [$Ca(CO)_3$]. Su presencia en el depósito de pasta probablemente ocurrió porque: i) es uno de los componentes de la materia prima para la fabricación de cemento y ii) debido a que la examinación con MEB y EDS se hizo un año después de la fabricación de las muestras, posiblemente para este tiempo la pasta ya presentaba indicios de carbonatación. Con relación a los elementos Fe y Al, su existencia en la examinación posiblemente se deba a los constituyentes del cemento C_3A (aluminato tricálcico) y C_4AF (ferroaluminato tetracálcico).

Figura 90. MEB y EDS a fibra de fique con residuos de pasta de cemento



[371] DE ANDRADE SILVA. Op. cit. p. 783.

Tabla 10. Resultados EDS de los residuos de pasta de cemento sobre la superficie de la fibra

Elemento	Peso (%)
CK	31,54
OK	16,94
CaK	45,05
SiK	0,80
AlK	0,48
FeK	5,19

2.4 CONCLUSIONES

Con base en los resultados y el análisis realizado en esta parte de la investigación, se concluye lo siguiente:

El mezclado y asentamiento del concreto fibro-reforzado es influenciado fuertemente por el volumen de fibra presente en la mezcla. La cantidad de 1,0% de fibra de fique dificultó el mezclado, provocando en ocasiones que la fibra se apelmazara, haciendo disminuir la resistencia del material, excepto el módulo de rotura a flexión.

El proceso de fabricación de las mezclas de concreto fibro-reforzado fue adecuado, lo anterior se afirma con base en los resultados obtenidos de porosidad abierta y cerrada, la cual era una variable de respuesta de carácter relevante en el estudio, y como se demostró, no tuvo variación significativa ni influyente sobre las características del material compuesto, por lo tanto, la variabilidad en las propiedades se dio por la adición de fibra en el concreto. Su importancia radicó en que de ella dependía si la modificación de las propiedades mecánicas y físicas se daba por la adición de la fibra en el concreto o por cambios en la porosidad.

Si bien la adición de fibra no mejoró la resistencia a la compresión ni a la tracción indirecta, una vez se alcanzaba la carga de rotura, sí logró reducir el agrietamiento del concreto y mantuvo unidas las partes sin desprendimiento; se demostró que la fibra sirvió de unión, evitando la falla repentina y aumentó la ductilidad del material, causando influencia significativa sobre las propiedades en mención por la adición de fibras.

El ensayo de flexión mostró que el concreto reforzado con fibra de fique corta, distribuida al azar, tiene un comportamiento de *softening*, controlando las grietas y deflexiones gracias al mecanismo de puente de la fibra. Además, en todas las dosificaciones de fibra, el módulo de rotura incrementó, al igual que la energía absorbida (tenacidad) respecto al concreto patrón, lo que da como resultado un producto más adecuado para aplicaciones no estructurales debido a la longitud de la fibra usada.

Las mezclas de concreto con jugo de fique mostraron un comportamiento frágil, similar al concreto patrón, sin embargo, la dosificación de concreto con 1,0% de aditivo natural causó un incremento en el módulo de rotura a flexión hasta del 30%, mientras que la dosificación con 3,0% de jugo presentó disminución del 25%. Por otra parte, la mezcla con 1,0% de jugo mantuvo hasta el 90% de la resistencia a la compresión y 82% de la resistencia a la tracción indirecta. Por otra parte, el uso de jugo de fique como aditivo promovió la mayor formación de porosidad aislada en el concreto, efecto provocado por el contenido de saponinas del aditivo natural que producen la formación de burbujas en la mezcla de jugo y concreto.

Se determinó que, para el rango de longitud de la fibra trabajado, ésta no tiene influencia significativa sobre las propiedades mecánicas del concreto fibro-reforzado con fique. También, que las adiciones de fibra de 0,5% y 0,75%, y de jugo de 1,0% y 2,0% fueron individualmente las que mejor respuesta arrojaron. Asimismo, se mantuvo constante la longitud de la fibra en 20 mm; por su parte, la dosificación

combinada de fibra y jugo de fique que exhibió compensación en sus propiedades fue la correspondiente a 0,5% de fibra y 1,0% de jugo de fique (CF5J1).

La combinación de fibra y jugo de fique produjo un aumento significativo en el módulo de rotura a flexión, especialmente en la energía absorbida, esto causado por la sinergia resultante del aumento de la porosidad aislada en la matriz cementicia, lo que hizo resaltar el trabajo de la fibra, permitiendo que actuara más efectivamente después de producirse el agrietamiento del concreto fibro-reforzado.

Desde el punto de vista de la adherencia observada, el tratamiento superficial a la fibra no fue totalmente efectivo para mejorar la adhesión entre la fibra y la matriz. Sin embargo, como en los concretos fibro-reforzados el principal mecanismo actuante post-agrietamiento fue la extracción de la fibra, al parecer la rugosidad lograda en la superficie del fique permitió obtener una mayor absorción de energía por fricción en el concreto reforzado con fibra tratada (CFT) y mantenerla en CJFT.

La examinación mediante MEB estableció que la fibra de fique tuvo falta de adherencia con la matriz cementicia, aunque algunas fibras mostraron lo contrario. De igual forma, se comprobó que la fibra falló por extracción de la matriz, aun cuando se observó que algunas de ellas presentaron rotura y ciertas fibras mostraron mayor adhesión con la matriz cementicia.

El análisis digital de imágenes mostró que la adición de fibra no modificó la porosidad del material fibro-reforzado; además, evidenció el cambio en la porosidad provocado por el uso de jugo de fique como aditivo en el concreto, resultado que fue comprobado mediante MEB.

La DRX de concreto con jugo de fique mostró que la adición de jugo de fique formó los mismos productos de hidratación con relación a la mezcla no adicionada, sin revelar cambios en las fases presentes. En este sentido, se determinó la presencia

de tobermorita, etringita y portlandita, asimismo, una cantidad alta de SiO_2, provenientes posiblemente de la formación de tobermorita o por la presencia de partículas de cuarzo del agregado fino.

El análisis EDS permitió evidenciar una alta concentración de Ca sobre la superficie de la fibra, confirmando la mineralización que sufrió el fique debido a la fijación de Ca^{+2} sobre su superficie. No obstante, en la fibra no se observaron signos de deterioro, a pesar de que estuvo inmersa en la solución de poro de la matriz cementicia aproximadamente un año.

Entre las ventajas de adicionar fibra de fique en el concreto, se encuentran que: reduce el comportamiento frágil característico del material, resistencia residual a los esfuerzos aplicados posterior al agrietamiento y aumento en la tenacidad material.

3. DURABILIDAD DE UN CONCRETO ADICIONADO CON JUGO Y FIBRA DE FIQUE TRATADA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los ambientes agresivos se refieren frecuentemente a la exposición que sufre el concreto en presencia de agentes agresivos: i) agua de mar que comprende ataque por cloro, ii) suelos con presencia elevada de sulfato, iii) cristalizaciones de sal, iv) ciclos de humedecimiento y secado, v) ciclos hielo-deshielo y vi) exposición en zonas industriales con alta concentración de dióxido de carbono (CO_2). En climas tropicales, como el de Colombia, la humedad relativa fomenta el proceso de carbonatación a una velocidad óptima[372].

Según Gómez Cano[373], no existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del concreto y relacionarla con la durabilidad. Sin embargo, varias investigaciones han indicado que la permeabilidad del concreto al aire y al agua es una medida adecuada de la resistencia del concreto contra la entrada de los medios agresivos en estado líquido o gaseoso y, en consecuencia, es una medida de la durabilidad potencial de un concreto determinado.

En este capítulo, el objetivo abordado fue evaluar el efecto combinado del empleo de jugo y fibra de fique tratada superficialmente sobre concreto convencional cuando es sometido a un ambiente agresivo atendiendo a sus propiedades químicas, físicas, mecánicas y de durabilidad. Para ello, se presenta la evaluación a la penetración de ion cloruro y de dióxido de carbono en concreto simple y en concreto adicionado con jugo y fibra de fique, estudiando de forma separada y combinada cada adición. Inicialmente, se expone la caracterización realizada mediante el ensayo rápido de ion cloruro teniendo en cuenta la norma ASTM C1760.

---

[372] RAMLI. Op. cit., p. 134.

[373] GOMEZ CANO, Juan Camilo. Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de concretos y morteros. Tesis de Ingeniería en Civil. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2008, p. 22.

Esta prueba se ejecutó en todas las 21 dosificaciones diseñadas y fabricadas en esta investigación, resaltando que sobre la conductancia eléctrica no hubo influencia de la cantidad y longitud de la fibra de fique, confirmando que los factores mencionados no modificaron la porosidad interconectada del material fibro-reforzado; por su parte, los concretos con jugo de fique mostraron una disminución significativa en la conductancia eléctrica respecto al concreto patrón.

Posteriormente, se aborda el proceso de exposición a un ambiente controlado y enriquecido con CO_2 de las 5 dosificaciones escogidas en las etapas anteriores de la investigación: concreto simple (mezcla patrón), concreto con aditivo comercial al 0,5% (mezcla con fines comparativos), concreto con 1,0% y 2,0% de jugo de fique (seleccionados por sus propiedades físicas y mecánicas), y concreto con jugo y fibra de fique tratada. Para esta prueba, la caracterización mecánica se llevó a cabo mediante el ensayo de resistencia a la compresión y con el fin de estimar la profundidad de penetración del CO_2 en el material se usó fenolftaleína al 1,0%. Asimismo, se analizó por medio de DRX los cambios provocados por el CO_2 sobre las fases cristalinas.

3.2 METODOLOGÍA

En esta parte de la investigación se llevaron a cabo 2 pruebas que permitieron estudiar el comportamiento de los concretos fabricados y estudiados en el capítulo 2. Estas pruebas fueron: i) el ensayo de conductividad eléctrica en concreto endurecido y ii) carbonatación acelerada. A continuación, se explica el proceso ejecutado en cada una de ellas.

3.2.1 Ensayo de conductancia eléctrica.

La prueba se llevó a cabo en un equipo marca Giatec Scientific Perma 2, el cual es un dispositivo especial para este tipo de ensayo.

La prueba se ejecutó siguiendo la norma ASTM C1760[374], con todas las dosificaciones estudiadas en esta investigación, en total 21, únicamente en el día 28 posterior a la fabricación de las probetas. Las muestras consistieron en 4 cortes de 100 mm de diámetro por 32 mm de alto, las cuales fueron extraídas de 2 de las probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto fabricadas para tal fin; en total fueron evaluadas 84 muestras. Realizado el corte, el espécimen se mantenía saturado de agua hasta la aplicación del ensayo; la saturación era necesaria para evitar cambios en la conductancia y variaciones dimensionales causadas por el secado de la muestra. Luego las muestras eran introducidas en las celdas, ajustando completamente las tuercas en los tornillos, con el fin de evitar la filtración de la solución y que se produjeran errores de medición; en la Figura 91 se observa el montaje de esta prueba. Posteriormente, eran llenadas las 2 celdas con una solución de NaCl al 3,0% preparada con agua destilada y se transmitía una corriente eléctrica con voltaje constante de 60 V durante un minuto, tiempo al cabo del cual, el equipo daba el valor de la corriente que atravesaba la muestra. Con los datos de corriente, diámetro y altura de la muestra, se calculó la conductancia eléctrica en miliSiemens/metro (mS/m). Se reporta en estas unidades para evitar valores de este parámetro menores a 1. A continuación se presenta la ecuación (4) con la cual se calculó la conductancia eléctrica.

$$\sigma = K \frac{I_1 * L}{V * D^2} \qquad \textit{Ecuación (4)}$$

Dónde:

σ: Conductancia eléctrica en volumen, [mS/m]

I1: Corriente al cabo de 1 minuto, [mA]

V: Voltaje aplicado, [V]. Constante de 60 V

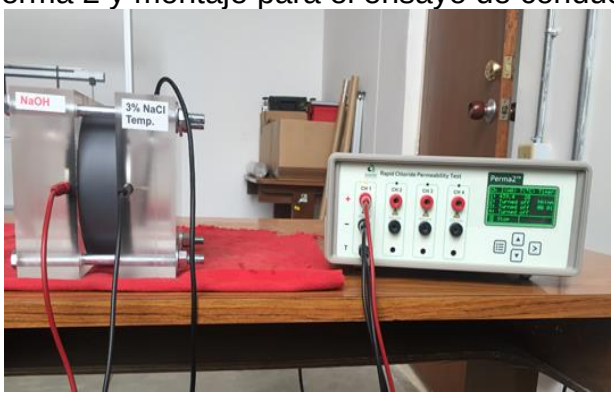
L: Altura promedio del espécimen, [mm]

[374] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2012. p. 1-5. ASTM C1760.

D: Diámetro promedio del espécimen, [mm^2]

K: Factor de conversión (1273,2)

Figura 91. Equipo Perma 2 y montaje para el ensayo de conductancia eléctrica



3.2.2 Ensayo de carbonatación acelerada. Este ensayo se llevó a cabo en una cámara de carbonatación acelerada, diseñada y fabricada con ese único propósito, la cual crea un ambiente con alta concentración de dióxido de carbono (CO_2), interactuando de manera controlada con la humedad relativa y la temperatura. La cámara de carbonatación (Figura 92) fue fabricada en lámina de acrílico y está dividida en 2 partes, en una se encuentra el tablero de control y el sistema de operación digital, eléctrico y electromecánico y la otra parte, cubierta con una tapa acrílica, actúa como un depósito que combina el aire, la humedad relativa (HR) y el CO_2 a determinadas condiciones de temperatura. La concentración de CO_2 fue monitoreada y medida con un sistema de emisiones integradas ENERAC modelo 700, el cual es un analizador portátil que permite medir parámetros de combustión y emisión de gases (Figura 93a). Asimismo, para controlar la concentración de CO_2 en la cámara, se necesitó un medidor digital de flujo marca Omega FMA 4000 (Figura 93b).

Figura 92. Cámara de carbonatación acelerada



Figura 93. Equipos de monitoreo y medición de CO_2



Figura 93a. Sistema de emisiones ENERAC 700



Figura 93b. Regulador y medidor de flujo de CO_2 Omega FMA 4000

El ensayo consistió en introducir en la cámara de carbonatación probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de alto en un ambiente controlado. Vale la pena aclarar que la fabricación y curado de las muestras se realizó como se explicó en la sección 2.2.1 del capítulo 2. Para definir las condiciones de humedad relativa y temperatura se usó una carta psicrométrica y con el fin de maximizar la difusión de CO_2 en el concreto se siguieron los rangos de valores sugeridos por Galán García[375] y Moreno[376]. En la Tabla 11 se presentan las condiciones de operación de la cámara

[375] GALAN GARCIA, Isabel. Carbonatación del hormigón: combinación de CO2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, 2011, p. 5.

[376] MORENO, Eric I., et al. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. En: Ingeniería, 2004, vol. 8, no. 2, p. 122.

de carbonatación establecidas para este estudio. La prueba se llevó a cabo a las dosificaciones de CS, CA05, CJ1, CJ2 y CJFT (Ver tabla 12) en el día 90 después de su fabricación, tiempo que se definió con el fin de evitar la influencia de humedad remanente en las muestras debido al proceso de curado, la cual obstaculiza la difusión del CO_2 al interior del concreto. En este día las probetas fueron expuestas al ambiente rico en CO_2 por periodos de tiempo de 48, 96 y 144 horas, cada uno de estos tiempos consiste en un ciclo; en total fueron 110 las muestras analizadas. En cada ciclo fueron extraídas muestras de la cámara y ensayadas a compresión siguiendo la norma ASTM aplicable. En el Anexo B se discrimina la cantidad ensayada para las dosificaciones en estudio.

Tabla 11. Condiciones de operación de la cámara de carbonatación

Parámetro	Valor
Humedad relativa (%)	50 – 60
Concentración CO_2 (%)	64 – 72
Temperatura (°C)	25
Flujo de CO_2 (lpm)	5,0
Flujo de aire seco (lpm)	5,5
Flujo de aire húmedo (lpm)	0,0

Rociando una solución al 1,0% de fenolftaleína en alcohol industrial sobre la sección longitudinal del espécimen de concreto, fracturada por tracción indirecta; las zonas con pH inferior a 8,5 no cambian de color, considerándose áreas carbonatadas, por el contrario, aquellas con pH entre 8,5 y 9,5 toman un color magenta y para pH superior a 9,5 un color púrpura[377]. Este cambio de coloración permitió determinar con un calibrador o vernier el frente de carbonatación radial, es decir, se midió desde la superficie externa de la muestra hacia el interior la profundidad de penetración del CO_2, lo cual se evidenciaba porque la superficie carbonatada no cambiaba de color, mientras que aquella sin ocurrencia de la reacción se tornaba de un color

[377] Ibid. p. 122.

magenta o púrpura. Fueron tomadas medidas en tres sectores distintos, con el fin de calcular un promedio del frente de avance de la reacción de carbonatación. Asimismo, con el fin de determinar el cambio de resistencia por efecto de la carbonatación se caracterizó mecánicamente el material mediante el ensayo de resistencia a la compresión, igualmente, se analizaron las fases formadas por medio de DRX. Fueron analizadas una muestra de concreto simple y tres de concreto con jugo de fique y aditivo natural. El análisis estadístico se hizo mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95% y $\alpha = 0,05$ usando el software estadístico *Statgraphics Centurion XV.*

3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados y el análisis de durabilidad de esta investigación. En primer lugar, se abordará lo concerniente al ensayo de conductancia eléctrica, también conocido como el ensayo rápido de ion cloruro. Luego se analizará la respuesta de los concretos en estudio cuando fueron expuestos a un ambiente rico en CO_2.

3.3.1 Conductancia eléctrica.

Como se mencionó en la metodología, esta prueba se llevó a cabo en todos los concretos fabricados en esta investigación. A continuación, en la Figura 94 se presenta el diagrama de Pareto para los concretos adicionados con fibra de fique. En este se observa que la cantidad y la longitud de la fibra no tuvieron un efecto significativo sobre la propiedad en cuestión, no obstante, su influencia fue positiva. Lo anterior indica que, con la adición de fibra la conductancia eléctrica presentó una ligera disminución que no fue representativa. Esto se comprueba con los diagramas de medias para la cantidad y longitud de fibra de la Figura 95, donde se observa que no hubo diferencia significativa cuando aumentó la cantidad de fibra en la mezcla respecto al concreto patrón, excepto para la dosificación con 1,0% de fique (Figura 95a).

De igual forma, ocurrió con la longitud de fibra (Figura 95b), aunque, en este caso la medida de 30 mm exhibió diferencia significativa, resultando menor respecto al concreto simple y las otras dos longitudes de fique (10 mm y 20 mm).

Figura 94. Diagrama de Pareto Estandarizado para la conductancia eléctrica de concreto con fibra de fique

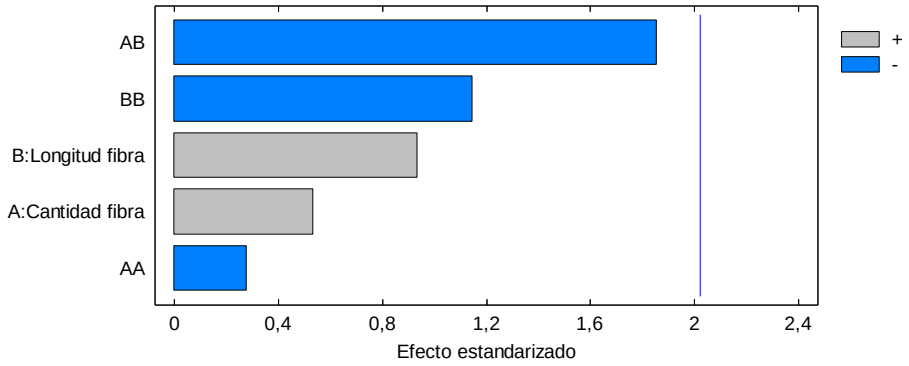
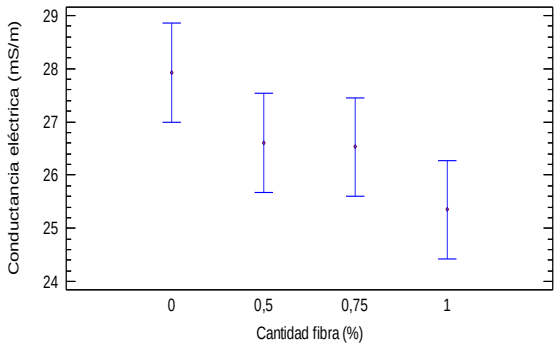
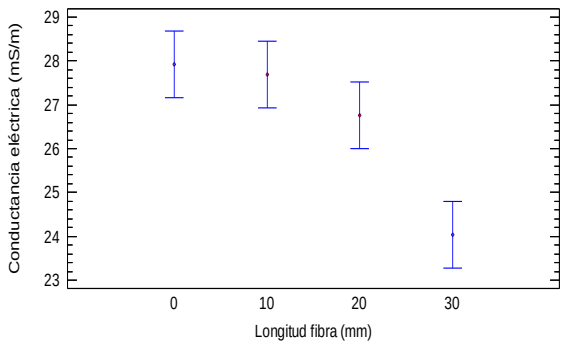


Figura 95. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con fibra de fique



95a. Medias para cantidad de fibra



95b. Medias para longitud de fibra

Es pertinente recordar que según las normas ASTM C1202 y C1760 los valores de conductancia son una medida de la permeabilidad del material y que también, la permeabilidad está relacionada con la porosidad interconectada o permeable,

autores como Lafhaj et al[378] y Herrera Ortiz[379] así lo confirman. En este sentido, el análisis de varianza (ANOVA) de las variables de respuesta porosidad permeable o interconectada y conductancia eléctrica, mostró que el valor-P del ANOVA fue de 0,0387 siendo menor que $\alpha = 0,05$; por lo tanto, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables estudiadas con un nivel de confianza del 95,0%.

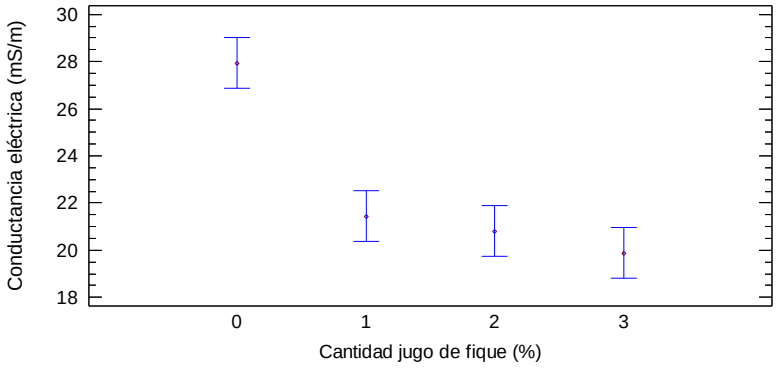
Ahora bien, estos resultados de conductancia tienen relación con los obtenidos en el capítulo 2 para los concretos elaborados con fique, en lo referente a que la adición de la fibra no modificó la porosidad interconectada del concreto fibro-reforzado, es decir, no cambió significativamente su permeabilidad. En este sentido, autores como Rehder[380] y Savastano Jr.[381] alcanzaron resultados similares en concreto poroso y reforzado con sisal, sugiriendo que, por la adición de fibra esta propiedad se mantuvo sin cambios relevantes, aportando en el comportamiento mecánico del material.

En la Figura 96 se presentan los resultados de conductancia para los concretos con jugo de fique. En contraste con lo obtenido en el capítulo 2, en donde, con el ensayo de porosidad abierta, el aditivo natural no mostró diferencia representativa de las distintas mezclas con el concreto simple y tampoco entre ellas, con la prueba de conductancia se evidenció que entre las dosificaciones con jugo y el concreto patrón hubo disparidad significativa, además que la conductancia disminuyó con diferencia no significativa entre las mezclas con aditivo natural. Este resultado confirma que no hubo aumento en la porosidad interconectada, por el contrario, este ensayo evidenció disminución en la permeabilidad respecto al concreto patrón, confirmando

[378] LAFHAJ Z., GOUEYGOU M., DJERBi A, KACZMAREK M. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. En: Cement and Concrete Research, 2006, vol. 36, p. 625 – 633.
[379] HERRERA ORTIZ, Julián Orlando, QUINTERO ORTIZ, Luz Amparo y CRUZ HERNADEZ, Ricardo. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas por medio de medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de un concreto convencional como aporte al estudio de la durabilidad. Tesis Maestría en Ingeniería de Materiales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010, p. 91 – 92.
[380] REHDER. Op. cit., p. 11.
[381] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 316.

que el jugo incrementó la porosidad aislada o cerrada; resultados semejantes fueron reportados por Ramírez Arellanes[382], para quien el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto conteniendo mucilago de nopal disminuyó en todas las edades de prueba.

Figura 96. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con jugo de fique

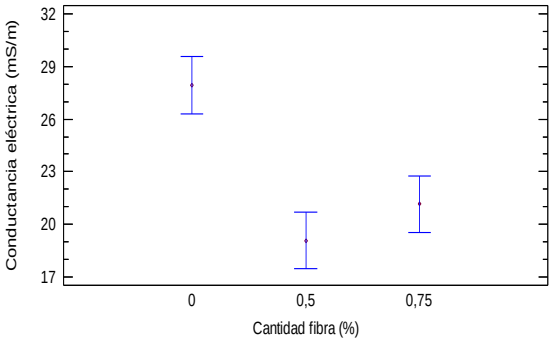


Ahora bien, en la Figura 97 se aprecia que los concretos con combinación de fibra y jugo de fique presentaron un comportamiento de la conductancia similar a lo expuesto en las Figuras 95 y 96. Por otra parte, los resultados obtenidos en esta sección permiten entender el comportamiento eléctrico del concreto, considerando que la corriente eléctrica se desplaza por la ruta más fácil, la cual se hace importante dentro del concreto[383].

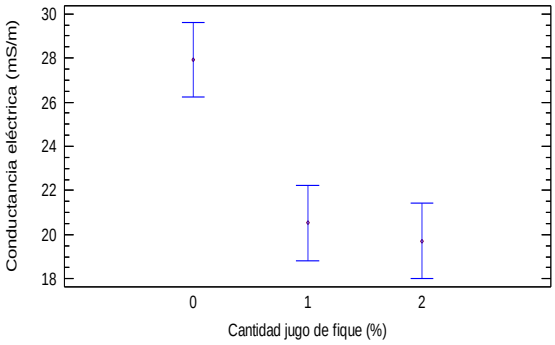
3.3.2 Carbonatación acelerada. Como se mencionó en la metodología, esta prueba se llevó a cabo únicamente con 5 tipos de concreto. En la Tabla 12 se muestra la convención de las mezclas estudiadas.

[382] RAMÍREZ ARELLANES. Op. cit., p. 336.
[383] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 63.

Figura 97. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la conductancia eléctrica de concreto con fibra y jugo de fique



97a. Medias para cantidad de fibra



97b. Medias para longitud de fibra

Tabla 12. Convención de los concretos sometidos a carbonatación

Tipo de concreto	Convención
Concreto simple	CS
CS + 0,5% de aditivo comercial	CA05
CS + 1,0% de jugo de fique	CJ1
CS + 2,0% de jugo de fique	CJ2
CS + 1,0% de jugo de fique + 0,5% de fibra de fique tratada	CJFT

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 12, fue analizado el concreto simple, el concreto con jugo de fique al 1,0% y 2,0%, el concreto con jugo y fibra de fique tratada y un concreto con aditivo comercial al 0,5%. En la Figura 98 se muestran las probetas de concreto una vez finalizado el ensayo de carbonatación acelerada y la posterior aplicación de fenolftaleína al 1,0%; allí se observan las superficies con fractura longitudinal realizada en los especímenes carbonatados. El uso de fenolftaleína permitió diferenciar las zonas en las que sucedió el cambio de pH, de esta manera se logró medir la profundidad de carbonatación a medida que aumentaba el tiempo de exposición.

Figura 98. Probetas carbonatadas con aplicación de fenolftaleína al 1,0%



Figura 98a. Muestra de CS antes de ser sometida a carbonatación



Figura 98b. Muestra de CS después de 144 horas de exposición a CO_2.



Figura 98c. Muestra de CJ1 después de 144 horas de exposición a CO_2.



Figura 98d. Muestra de CJ2 después de 144 horas de exposición a CO_2.

En la Figura 98a se aprecia que las muestras antes de ingresar en la cámara de carbonatación acelerada presentaron cierto grado de carbonatación en la capa externa del material cementicio. Con relación a las Figuras 98b, 98c y 98d, se exhiben las diferentes profundidades de carbonatación para CS, CJ1 y CJ2 después de 144 horas de exposición acelerada al ambiente rico en CO_2. En estas se evidenció que el concreto denominado CJ2 mostró la mayor área carbonatada (zona sin cambio de color), asimismo, que la zona no carbonatada tenía un color púrpura indicando un pH superior a 9,5.

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de penetración radial antes de iniciar la carbonatación y después de 144 horas de exposición al CO_2. En el tiempo de exposición igual a cero horas las probetas presentaron carbonatación entre

2,14mm y 2,73mm. Lo anterior se explica por la reacción entre el dióxido de carbono presente en el ambiente con la capa externa de la muestra, la cual presenta mayor porosidad.

Tabla 13. Resultados de avance de la carbonatación en el tiempo 0 horas y después de 144 horas

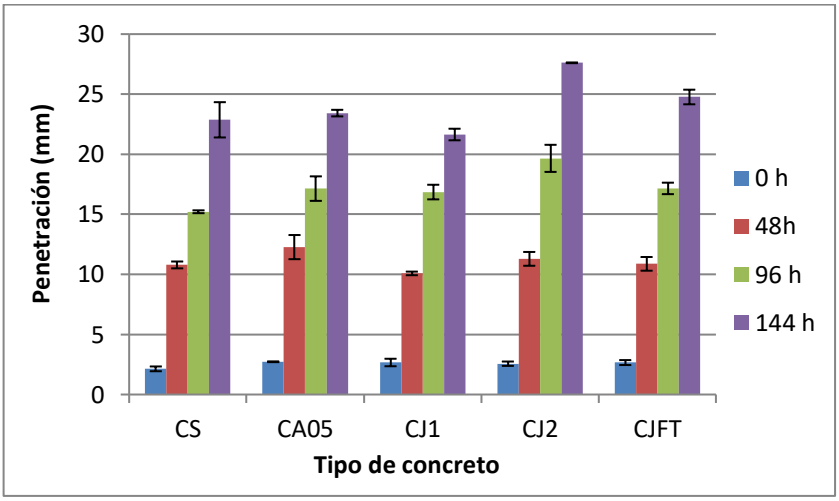
Concreto	Penetración radial (mm) en 0 horas	Desviación estándar	Penetración radial (mm) en 144 horas	Desviación estándar
CS	2,14	0,20	22,87	1,47
CA05	2,73	0,03	23,43	0,27
CJ1	2,67	0,31	21,64	0,48
CJ2	2,56	0,18	27,61	0,03
CJFT	2,67	0,21	24,77	0,609

Lo mostrado en la Tabla 13 se comprueba en el diagrama de columnas de la Figura 99. Allí se observa que en todas las dosificaciones se evidenció carbonatación antes de ingresar a la cámara de carbonatación. Además, refleja que desde las primeras 48 horas hubo diferencia significativa en la penetración radial con relación al tiempo cero. También que la mezcla CA05 no proporcionó protección adecuada a la carbonatación, obteniendo profundidades similares al concreto patrón, de manera semejante a lo reportado por Jaramillo Zapata[384]. Caso contrario ocurrió con la dosificación CJ1, la cual logró la menor penetración con diferencia estadística significativa respecto a los demás concretos. Por su parte, el concreto adicionado con jugo y fibra de fique tratada evidenció una de las mayores profundidades de carbonatación, solamente siendo inferior a la mostrada por CJ2. La penetración radial alcanzada por CJ2 indica que probablemente se favoreció la difusión de CO_2 en el concreto debido a la mayor porosidad en el material, también reportado por

[384] JARAMILLO ZAPATA. Op. cit., p. 126.

Roma et al[385]. Para Poole y Sims[386], la profundidad de carbonatación tiene relación directa con la presencia de porosidad en el material. Para Gómez Cano[387], la permeabilidad del concreto se mide de manera similar que para fluidos y gases. Con relación a los gases, estos pueden penetrar en el concreto por difusión, fenómeno que ocurre debido a un gradiente de presión.

Figura 99. Comportamiento de la penetración radial con el tiempo de exposición al CO_2



Por otra parte, los diagramas de Pareto de la Figura 100 evidenciaron una influencia positiva y significativa del tiempo de exposición sobre la resistencia a la compresión del concreto, es decir, a mayor tiempo de exposición al ambiente agresivo de CO_2 la resistencia a la compresión aumentó. Además, como era de esperarse, el jugo de fique tuvo una influencia significativa y negativa sobre la resistencia a la compresión del concreto (Figura 100a), es decir, el aditivo natural provocó la disminución de la propiedad mecánica, debido a la mayor formación de poros al interior del material,

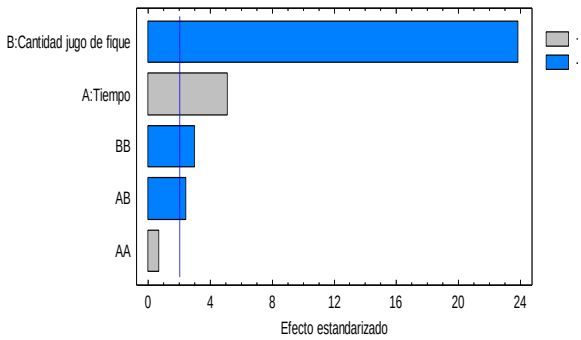
[385] ROMA Jr., Luis C.; MARTELLO, Luciane S.; SAVASTRANO Jr., Holmer. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. Noviembre 28 de 2006. Revista Construction and Building materials, 22, p. 671. (Recuperado el 5 septiembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

[386] POOLE, Alan y SIMS, Ian. A handbook of investigative techniques. Boca Ratón: CRC press, 2016. p. 491 – 500. ISBN 978 – 1 – 85617 – 690 – 3.

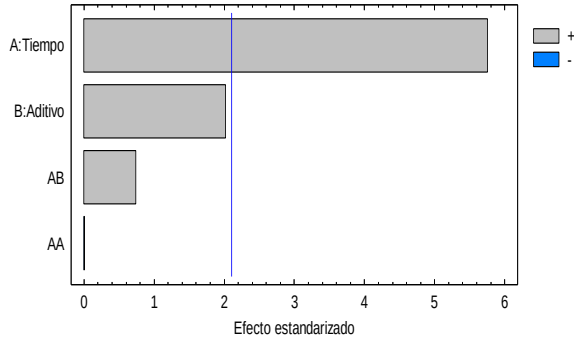
[387] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 23.

situación que fue explicada en la sección 2.3.2 del capítulo 2, y no por la reacción de carbonatación en el concreto, efecto que se puede observar en la Figura 102.

Figura 100. Diagramas de Pareto Estandarizado de resistencia a la compresión para concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2



100a. Diagrama de Pareto para jugo de fique



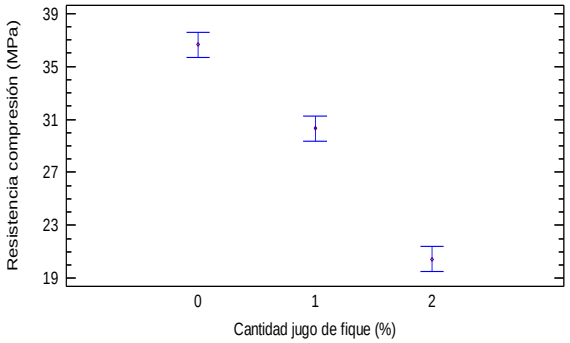
100b. Diagrama de Pareto para aditivo comercial

Mediante los diagramas de medias que se presentan en la Figura 101 se logró la anterior comprobación. En la Figura 101a se observa que la adición de jugo de fique provocó una influencia significativa sobre la resistencia a la compresión de concreto carbonatado, haciendo que ésta disminuyera. Por otro lado, las Figuras 101a y 101b evidencian que el tiempo de exposición al CO_2 fue significativo para aumentar la propiedad mecánica en cuestión.

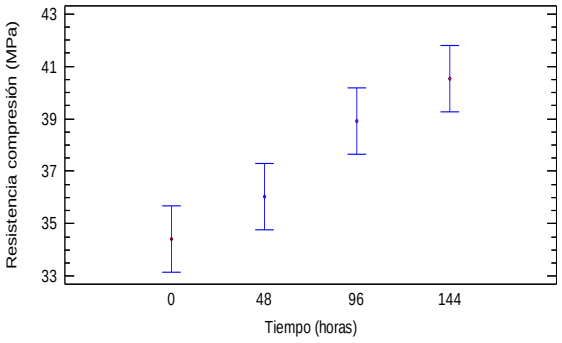
Como se observa en la Figura 102, todas las mezclas analizadas mostraron aumento en la resistencia a la compresión. En este sentido, las muestras fabricadas con aditivo comercial (CA05) y CS no presentaron diferencia estadística significativa entre ellas, sin embargo, sí presentaron una mayor ganancia de resistencia a la compresión respecto a las dosificaciones CJ1, CJ2 y CJFT a mayor tiempo de exposición en el ambiente rico en CO_2, durante los mismos periodos de tiempo. Lo anterior ocurre porque en la cámara con ambiente controlado y enriquecida con CO_2, la reacción de carbonatación ocurre de forma rápida, modificando las

propiedades mecánicas del compuesto cementicio, aumentando su resistencia. Según Ardanuy[388], este proceso generalmente ocurre en cámaras de humedad con atmósferas enriquecidas con CO_2.

Figura 101. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para la resistencia a la compresión de concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2

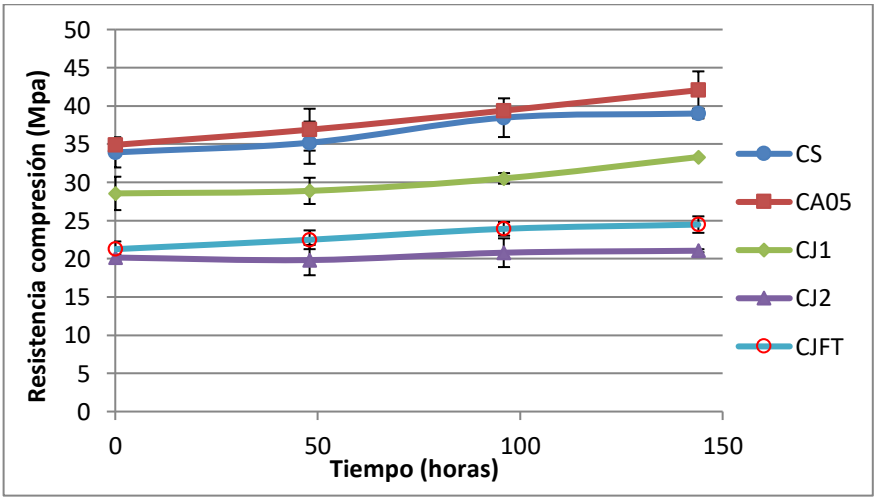


101a. Efecto del jugo de fique en la resistencia a la compresión



101b. Efecto del tiempo en la resistencia a la compresión de concreto con aditivo

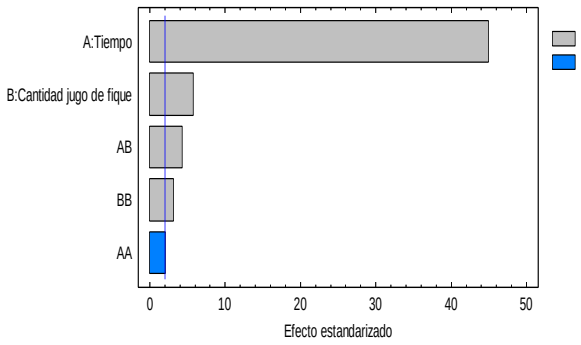
Figura 102. Comportamiento a compresión de concreto sometido a carbonatación acelerada



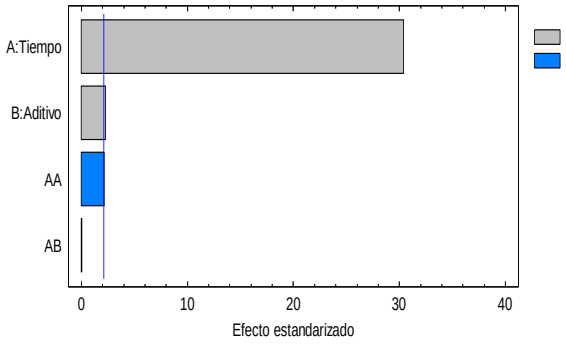
[388] ARDANUY. Op. cit. p. 125.

El diagrama de Pareto de la Figura 103 presenta la penetración radial. Allí se observa que el tiempo de exposición fue el factor que más influyó sobre la variable en estudio; por otro lado, la adición de los aditivos natural y comercial, también evidenciaron un efecto significativo y positivo sobre la penetración radial, es decir, a mayor tiempo en el ambiente rico en CO_2 y, en menor medida los aditivos, contribuyeron con el ingreso del dióxido de carbono en el material favoreciendo la reacción de carbonatación. Este escenario puede ser comprobado en el diagrama de medias de la Figura 104, en donde se observa que a mayor tiempo de las muestras en la cámara de carbonatación mayor fue la penetración del CO_2. Cabe resaltar que el rango de humedad usado en la investigación (50% a 60% de humedad relativa) favoreció el proceso de carbonatación en el concreto. Se usó este rango de humedad según lo recomendado por Gómez Cano[389].

Figura 103. Diagramas de Pareto Estandarizado de penetración radial para concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2



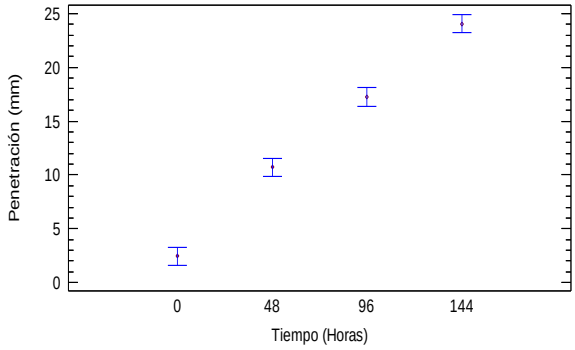
103a. Diagrama Pareto jugo de fique



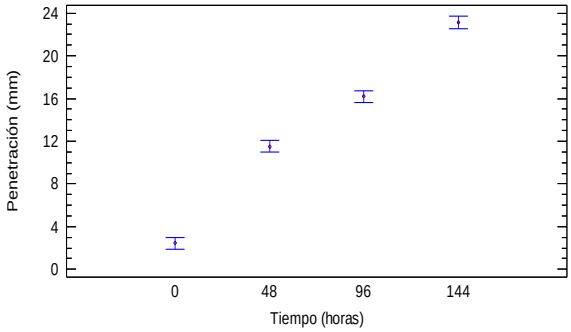
103b. Diagrama Pareto aditivo comercial

[389] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 17.

Figura 104. Gráfico de medias (95% de Fisher LSD) para penetración radial de concreto con jugo de fique y aditivo comercial sometido a CO_2



104a. Efecto del tiempo en la penetración radial de concreto con jugo de fique



104b. Efecto del tiempo en la penetración radial de concreto con aditivo

Con base en los resultados del ensayo de carbonatación se calcularon los coeficientes de carbonatación para cada una de las dosificaciones estudiadas en esta parte de la investigación. Los coeficientes fueron calculados en *Statgraphics Centurion XV*. Según Tonoli[390], el modelo se ajusta a uno de raíz cuadrada del tiempo ($Xc = Kc * \sqrt{t}$). Este modelo fue probado en el software estadístico, pero en todos los casos obtuvo un coeficiente de correlación inferior al de un modelo lineal, por lo tanto, se definió un modelo de ajuste lineal ($Y = a + bX$), siendo *Y* la profundidad de penetración (X_c), *b* el coeficiente de carbonatación (K_c), *X* el tiempo (*t*) y *a* la carbonatación inicial presentada en el día 90 posterior a la fabricación de las muestras. La comparación entre los 2 modelos se muestra en la Tabla 14.

En todos los casos el valor-P fue menor que 0,05, esto indica que existe una relación estadísticamente significativa entre la penetración radial y el tiempo de exposición en el ambiente rico en CO_2 con un nivel de confianza del 95,0%. Asimismo, los coeficientes de correlación y R-cuadrado ajustados particularmente altos indican una relación fuerte entre las variables, especialmente para el modelo lineal.

[390] TONOLI. Op. cit., p. 229.

Tabla 14. Modelo de ajuste y coeficiente de carbonatación para la penetración en función del tiempo de exposición

Concreto	Kc modelo ($\sqrt{t}$)	Coeficiente correlación para ($\sqrt{t}$)	R-cuadrado ajustado para ($\sqrt{t}$)	Kc modelo lineal	Coeficiente correlación modelo lineal	R-cuadrado ajustado modelo lineal
CS	1,61	0,97	92,04	0,14	0,99	97,98
CA05	1,65	0,99	96,35	0,14	0,99	97,04
CJ1	1,55	0,98	93,92	0,13	0,99	98,67
CJ2	1,99	0,97	90,19	0,17	0,99	99,94
CJFT	1,74	0,97	90,87	0,15	0,99	99,64

Vale la pena aclarar que K_c es un valor que no es constante a través de toda la pasta. Esta situación se evidenció en la Figura 98, en donde, para la misma sección longitudinal, se pueden apreciar diferentes profundidades de carbonatación, es decir, el frente de carbonatación no era completamente uniforme a través de su espesor; apreciación reportada de manera semejante por Gómez Cano[391].

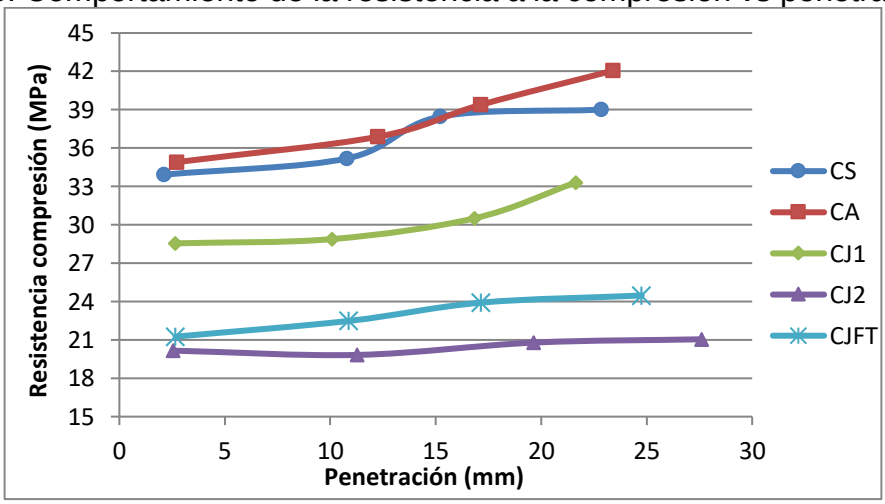
Por otra parte, se determinó la relación entre la resistencia a la compresión y la penetración radial, usando el promedio de 3 datos de cada variable, para cada una de las dosificaciones sometidas a carbonatación acelerada. Este comportamiento se muestra en la Figura 105 y los coeficientes de correlación y R-cuadrado ajustado para estas correspondencias se muestran en la Tabla 15. Los datos fueron ajustados a un modelo lineal.

La Figura 105 evidencia la carbonatación inicial ocurrida en cada concreto, y también confirma que la dosificación CJ2 fue aquella con la mayor penetración y la menor resistencia a la compresión. Lo anterior posiblemente fue el resultado de la mayor porosidad provocada por este porcentaje (2,0%) de jugo de fique, como se expuso en la sección 2.3.2 del capítulo 2. La menor penetración la obtuvo CJ1, pese

[391] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 48.

a no alcanzar la mayor resistencia a la compresión, obtenida por el concreto con aditivo comercial. Este comportamiento demuestra que la dosificación CJ1 no incrementó la porosidad interconectada con relación a CS, por el contrario, la porosidad cerrada producida por el jugo restringió la difusión de CO_2 al interior del material.

Figura 105. Comportamiento de la resistencia a la compresión vs penetración radial



Si bien, los coeficientes de correlación estuvieron cercanos a la unidad, indican una relación relativamente fuerte entre las variables; sin embargo, el valor-P para cada mezcla de concreto fue superior a 0,05, evidenciando que no hay una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a la compresión y la penetración radial con un nivel de confianza del 95,0%.

La pasta de cemento es altamente alcalina, con un pH mayor a 12,5. Este pH se debe a la presencia de los productos de hidratación, hidróxido de calcio y menores cantidades de sales alcalinas de sodio y potasio. Bajo condiciones ideales de carbonatación (50% a 70% de humedad relativa) y una superficie expuesta, el CO_2 reacciona con la cal hidratada o hidróxido de calcio–$Ca(OH)_2$ para formar carbonato de calcio ($CaCO_3$), que es el mismo mineral que la calcita o la caliza. Este fenómeno progresa lentamente, reduciendo el pH de la mezcla, carbonatando el material y

dejando desprotegido el acero de refuerzo para efectos de corrosión[392]. Por lo tanto, la reacción de carbonatación involucra la transformación de portlandita en $CaCO_3$[393] (reacción 8).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \textit{Reacción (8)}$$

Tabla 15. Modelos de ajuste para la relación resistencia a la compresión y penetración radial

Concreto	Ecuación	Coeficiente correlación	R-cuadrado ajustado modelo lineal
CS	F'c=0,27*Xc + 33,24	0,93	80,93
CA05	F'c=0,35*Xc + 33,48	0,98	94,02
CJ1	F'c=0,24*Xc + 27,25	0,91	74,43
CJ2	F'c=0,04*Xc + 19,80	0,83	52,84
CJFT	F'c=0,15*Xc + 20,92	0,98	95,06

Como se mencionó, la carbonatación es la disminución de pH en el concreto que ocurre cuando el CO_2 atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del material y convierte el $Ca(OH)_2$ con alto pH a $CaCO_3$, que tiene un pH menor, lo que genera la desprotección del acero de refuerzo frente a la corrosión. Esta protección se logra inicialmente por la formación de una capa pasiva homogénea de óxido sobre la superficie del acero al contacto con el concreto fluido y que permanece estable en el ambiente alcalino[394]. Cuando penetra la carbonatación hasta la profundidad del refuerzo y el pH desciende por debajo de 9,5 la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable aumentado la posibilidad de que empiece la corrosión. Sólo se requiere de una pequeña concentración de CO_2 que

[392] Ibid. p. 23.
[393] JARAMILLO ZAPATA, Op. cit., p. 126.
[394] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 23.

normalmente se encuentra presente en la atmósfera (0,04%) para que ocurra la carbonatación en el concreto[395]. Éste fenómeno es función del tiempo, de la humedad del concreto, y de la porosidad, esta última directamente relacionada con la relación a/c, y del contenio de materia alcalina carbonatable. Es decir, que si el elemento de concreto está en contacto con el aire y si existe dentro de la matriz cementante cal libre, componente que es siempre un subproducto de la hidratación del cemento, es un asunto de tiempo para que el CO_2 circundante se difunda hacia el interior del elemento[396].

Para Moreno[397], la profundidad de carbonatación que se obtiene en el concreto en un año de exposición en un ambiente normal es de 3,3 mm. Teniendo en cuenta lo anterior, y que para esta investigación la concentración promedio de CO_2 usada en la cámara de carbonatación fue de 68%, las 144 horas de exposición fueron equivalentes a 34 años en un ambiente normal, por lo que un día bajo las condiciones de la cámara fue semejante a 5,67 años, considerando la penetración constante de 3,3 mm/año. Asimismo, la concentración de CO_2 en el ambiente controlado y acelerado fue 1700 veces mayor a la concentración en un ambiente natural (0,04%).

En contraste con lo expuesto acerca de concreto reforzado con varilla de acero, en los materiales cementicios reforzados con fibras naturales, la carbonatación acelerada es una alternativa para aumentar la durabilidad de estos compuestos fibro-reforzados porque el proceso permite mantener, e incluso aumentar, su resistencia mecánica, lo que indica una mayor durabilidad. Por lo tanto para Ardanuy[398], la disminución en la alcalinidad de la matriz cementicia, asociado a una menor porosidad, diámetro de poro y densificación de la matriz por la precipitación de $CaCO_3$ podría explicar la mitigación de una degradación compuesta.

[395] Ibid. p. 24.
[396] Ibid. p. 45.
[397] MORENO. Op., cit. p. 129.
[398] ARDANUY. Op. cit., p. 125.

Según Gomez Cano[399], los factores de mayor influencia en la permeabilidad del concreto se podrían agrupar en: i) relacionados con el ambiente y ii) relacionados con las características del concreto. Para los primeros, podrían influir las condiciones climáticas del lugar, exposición a altas temperaturas, posibilidad de incendio, ciclos hielo-deshielo y de humedecimiento-secado, entre otros. Con relación a los segundos, se tendrían en cuenta los materiales constitutivos del concreto, procesos constructivos, diseños especiales y mantenimiento, entre otros.

La porosidad y la permeabilidad constituyen una de las principales causas de deterioro de las estructuras de concreto. Un alto porcentaje de agua que se utiliza para la elaboración de concreto, por razones de fluidez, no se requiere en el proceso de hidratación y termina dejando en la matriz una serie de poros, posiblemente interconectados, y que posteriormente son un factor determinante para volver la matriz más permeable[400]. Por consiguiente, una alta permeabilidad contribuye al avance rápido del frente de carbonatación, ya que presenta una mayor difusión de CO_2.

Para Jaramillo[401] las burbujas de aire microscópicas incorporadas uniformemente, hacen que el aire ocluido en la matriz de concreto interrumpa la succión capilar, disminuyendo la permeabilidad del concreto, mejorando su resistencia a agentes químicos exteriores como los carbonatos, asimismo lo reportó Ochoa[402]. También para Jaramillo[403] el movimiento de agua y de agentes agresivos al interior del concreto, no sólo es función de la porosidad del material, sino que depende también del diámetro de los poros, su distribución y continuidad. En general, la porosidad total representa el contenido total de poros existentes, los cuales no necesariamente

[399] GOMEZ CANO. Op. cit., p. 46.
[400] Ibid., p. 24.
[401] JARAMILLO ZAPATA. Op. cit., p. 103.
[402] OCHOA. Op. cit., p. 455.
[403] JARAMILLO ZAPATA. Op. cit., p. 103.

deben estar interconectados entre sí y, por lo tanto, no siempre permiten el paso de un fluido.

Con base en los resultados de carbonatación, se puede decir que el grado de porosidad no fue directamente proporcional con la permeabilidad, ya que fue posible introducir en el concreto con jugo de fique al 1,0% (CJ1) una red de poros microscópicos no conectados entre sí, que mejoraron la impermeabilidad y que probablemente protegieron al concreto en el ambiente agresivo de CO_2.

En las Figuras 106 y 107 se presenta la comparación del análisis realizado mediante DRX entre CS y CJ1 sin y con exposición al CO_2 respectivamente. En los difractogramas de concreto carbonatado (en la leyenda los concretos con terminación–CO_2) las flechas en color rojo indican que no fue detectada portlandita, la cual en el concreto sin carbonatar está presente en las reflexiones a 18° y 34°, pero fue detectado un incremento en la reflexión a 29,5° correspondiente a $CaCO_3$, el cual se indica con flechas en color negro, demostrando la ocurrencia del proceso de carbonatación, similar a lo reportado por Tonoli[404]. Asimismo, las flechas en color azul muestran el incremento en la intensidad del pico correspondiente a tobermorita en 27°, probablemente asociado a mayor formación de este compuesto por causa de iones Ca que son liberados del $Ca(OH)_2$ durante la reacción de carbonatación. También vale la pena tener en cuenta que solo en CS-CO_2 la intensidad de la reflexión de etringita que se da a 21° y que incrementó respecto a CS. Lo anterior, según Tonoli[405], es asociado a la reacción de carbonatación. Igualmente, se observó que el aumento en la intensidad de las reflexiones a 21° fue nulo en CJ1-CO_2 y a 27° y 29,5° fue menor en CJ1-CO_2 que en CS-CO_2, indicando que posiblemente el jugo de fique aminore el efecto producido por el CO_2 en la matriz cementicia desfavoreciendo el fenómeno de carbonatación. En conclusión, los resultados de los difractogramas permitieron confirmar la carbonatación sufrida por los concretos

[404] TONOLI. Op. cit. p. 229.
[405] Ibid., p. 230.

en estudio, aunque en menor proporción para el concreto adicionado con jugo de fique al 1,0%.

Figura 106. Comparación de difractogramas de CS sin y con exposición a CO_2

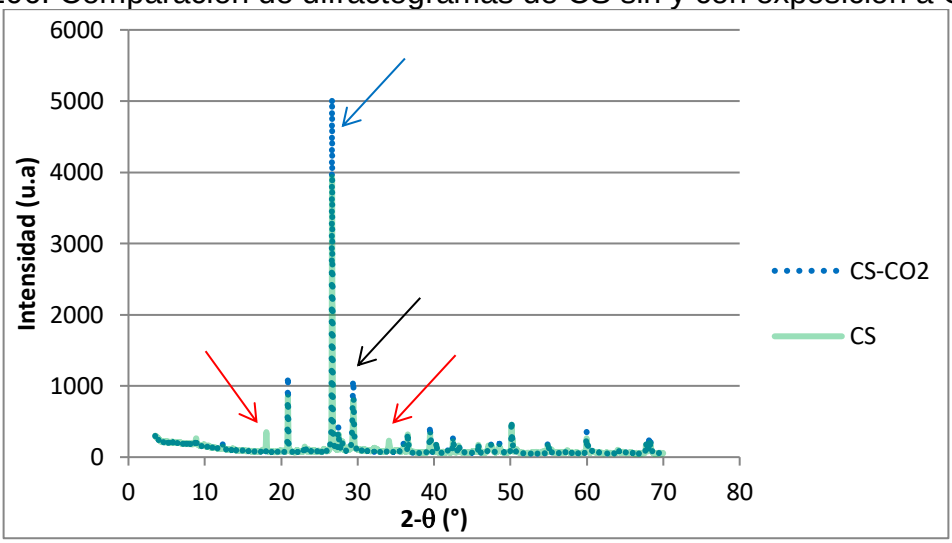
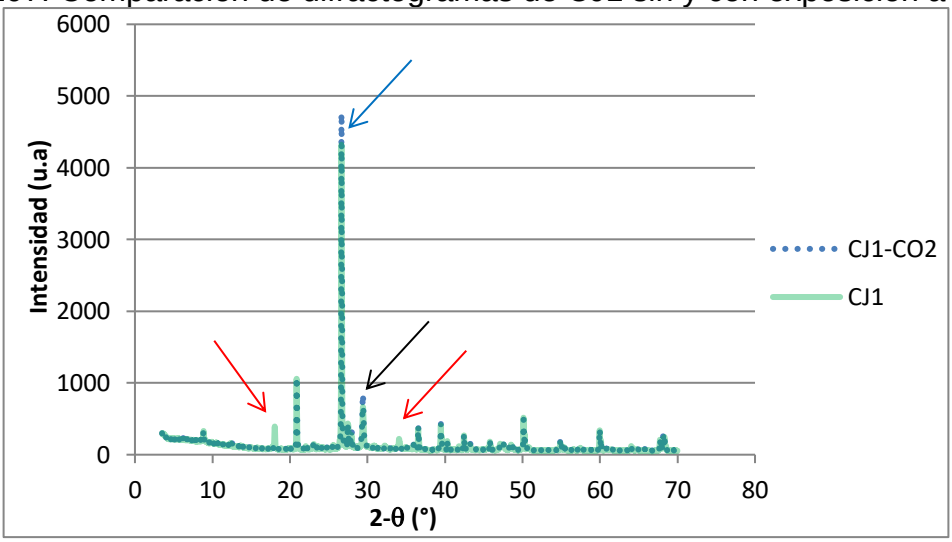


Figura 107. Comparación de difractogramas de CJ1 sin y con exposición a CO_2



Por último, algunos autores como De Almeida Melo Filho[406] y Ardanuy[407] han reportado la carbonatación acelerada en la matriz cementicia como una opción a fin

[406] DE ALMEIDA MELO FILHO. Op. cit., p. 31.
[407] ARDANUY, Op. cit., p. 125.

de evitar la degradación de las fibras naturales cuando son adicionadas como refuerzo al concreto. En este sentido, Roma[408] y Ardanuy[409] reportaron que la fibra sufre descomposición por su exposición al ambiente alcalino y que una alternativa para su conservación es disminuir el pH de la matriz reduciendo o eliminando la portlandita del medio. También Savastano[410] indica que la sustitución parcial del Clinker por material puzolánico y la carbonatación acelerada son medios conocidos para mejorar la durabilidad del refuerzo de fibra vegetal. Estos aspectos serían una opción a tener en cuenta para futuras investigaciones que involucren mejorar la durabilidad de la fibra de fique en el concreto.

3.4 CONCLUSIONES

Con base en los resultados y el análisis realizado en esta parte de la investigación, se concluye lo siguiente:

La conductancia eléctrica no presentó influencia de la cantidad y longitud de la fibra de fique. Teniendo en cuenta que la permeabilidad y la porosidad interconectada están relacionadas, este resultado confirmó lo hallado en el capítulo 2, en donde los factores en cuestión no modificaron la porosidad abierta del concreto fibro-reforzado y por ende la permeabilidad del mismo.

Respecto a los concretos con jugo de fique, la conductancia eléctrica disminuyó significativamente con relación al concreto patrón, pero no mostró diferencia significativa entre los concretos adicionados. Estos resultados confirman que la corriente eléctrica se desplaza por la ruta que ofrece menor resistencia al movimiento, evidenciando que la porosidad aislada, generada por el jugo, mitigó la formación de poros conectados entre sí.

[408] ROMA Jr. Op. cit., p. 672.
[409] ARDANUY, Op. cit., p. 125.
[410] SAVASTANO Jr. Op. cit., p. 311.

El uso de fenolftaleína al 1,0% permitió diferenciar en color púrpura las zonas en las que sucedió el cambio de pH. De esta manera se logró medir la profundidad de carbonatación a medida que aumentaba el tiempo de exposición. Esta prueba permitió evidenciar que las muestras antes de ser ingresadas a la cámara con ambiente rico en CO_2 presentaron carbonatación entre 2,14mm y 2,73mm. Asimismo que, el concreto con jugo de fique al 2,0%, denominado CJ2, mostró la mayor profundidad de carbonatación y el concreto con jugo de fique al 1,0% (CJ1) la menor, también que la mezcla CA05 no proporcionó una protección adecuada al ingreso de CO_2 obteniendo profundidades similares al concreto patrón. Estos resultados indican que CJ1 no favoreció la difusión de CO_2 al interior del material, mientras que CA05 y CJ2 si beneficiaron en mayor grado este fenómeno, probablemente por el tipo y cantidad de poros en la matriz.

Los concretos adicionados con jugo de fique y jugo con fibra tratada presentaron disminución en la resistencia a la compresión respecto al concreto patrón, lo anterior, ocasionado por el incremento en la porosidad cerrada del material cementicio. Sin embargo, se evidenció aumento en la resistencia a mayores tiempos de exposición al CO_2 en las 5 dosificaciones estudiadas. Este incremento en la resistencia a la compresión ocurre porque en la cámara con ambiente controlado y enriquecida con CO_2 la reacción de carbonatación ocurre de forma rápida.

Con base en el análisis estadístico de la prueba de carbonatación, las mezclas en estudio mostraron que los modelos lineales presentaron mayores coeficientes de correlación y R-cuadrado ajustado que los modelos de raíz cuadrada del tiempo. Lo anterior indica que, para cuestiones de predicción de la profundidad de carbonatación, ésta va a ser más precisa con el modelo lineal calculado para cada dosificación.

Para la dosificación de concreto con 1,0% de jugo de fique, las burbujas de aire incorporadas por el uso del aditivo natural provocaron que el aire ocluido en la matriz

cementicia interrumpiera la succión capilar, disminuyendo la permeabilidad del concreto. Esto también indica que no necesariamente el contenido total de poros existentes deban estar interconectados entre sí, por el contrario, la porosidad cerrada o aislada posiblemente interrumpió la difusión del CO_2 hacia el interior del material cementicio.

La difracción de rayos X permitió establecer la ausencia de portlandita y el incremento en la formación de $CaCO_3$ como resultado de la carbonatación provocada a los concretos en estudio. En este sentido, en todas las dosificaciones se detectó mayor formación de $CaCO_3$ sin hidróxido de calcio presente, en particular, cabe resaltar que el concreto con jugo de fique al 1,0% presentó la menor intensidad de formación de $CaCO_3$ respecto a los otros concretos en estudio.

Entre los resultados se destaca que la resistencia a la compresión aumentó a mayor tiempo de exposición de los concretos al CO_2. Igualmente, con la prueba de fenolftaleína se determinó visualmente la carbonatación ocurrida en el material, llegando hasta 21,64±0,48 mm para el concreto con jugo de fique al 1,0%, siendo la menor penetración radial obtenida, y hasta 27,61±0,03 mm para el concreto con jugo al 2,0%, siendo la más alta. Además, fue posible identificar mediante DRX la ausencia de portlandita y el incremento en la formación de carbonato de calcio ($CaCO_3$) en los 5 concretos estudiados; del mismo modo, se determinó que el concreto con 1,0% de jugo mostró menor formación del carbonato, indicando una mejora en el comportamiento del concreto frente al ataque por agentes agresivos debido a su capacidad como aditivo inclusor de aire.

En los materiales cementicios reforzados con fibras naturales, la carbonatación acelerada es una alternativa para aumentar la durabilidad de estos compuestos fibro-reforzados porque el proceso permite aumentar su resistencia mecánica, lo que indica una mayor durabilidad. Lo anterior, debido a la disminución en la

alcalinidad de la matriz cementicia, asociado a una menor porosidad, diámetro de poro y densificación de la matriz por la precipitación de $CaCO_3$.

4. CONCLUSIONES GENERALES

Si bien cada capítulo contiene las conclusiones correspondientes de los objetivos abordados, de modo general se puede concluir que:

Con relación a la primera hipótesis, “la adición de fibra de fique produciría un concreto convencional con mejorada resistencia a la tracción y flexión por causa de su efecto como material de refuerzo”, cabe decir que es rechazada en lo referente al comportamiento del material ante esfuerzos de tracción indirecta porque esta propiedad disminuyó con la adición de fibra de fique. Sin embargo, esta hipótesis, se afirma respecto al concreto sin refuerzo, puesto que la energía absorbida por el material reforzado aumentó significativamente ante esfuerzos de flexión, esto ocasionado por la sinergia resultante del aumento de la porosidad aislada, la cual hizo resaltar el trabajo de la fibra, permitiendo que actuara efectivamente después de producirse el primer agrietamiento. Asimismo, el principal mecanismo actuante observado post-agrietamiento fue la extracción de la fibra, lograda por la rugosidad de la superficie del fique, la cual produjo que la fibra actuara mediante un mecanismo de puente entre las partes del concreto reforzado, manteniendo unidas a éstas, evitando la falla repentina y aumentado la ductilidad del material.

Respecto a la segunda hipótesis, “el uso como aditivo natural del jugo de fique mejoraría el comportamiento del concreto ante el ataque por agente agresivo tipo carbonato, debido a su característica como aditivo inclusor de aire”, el análisis de resultados permitió su validación. En la dosificación de concreto con 1,0% de jugo de fique, la formación de burbujas de aire incorporadas por el uso del aditivo natural, provocaron que en la matriz cementicia fuera posible introducir una red de poros microscópicos no conectados entre sí, que mejoraron la impermeabilidad y que contribuyeron a proteger el concreto del ambiente agresivo de CO_2 interrumpiendo su difusión hacia el interior del material.

Tras el desarrollo de esta disertación doctoral se afirma que el jugo de fique es una sustancia de carácter ácido con presencia de saponinas, que actúan como agentes surfactantes y tensoactivos con la capacidad de producir espuma, por lo que actúa como agente inclusor de aire en mezclas base cemento; además, el 92,82% de su composición corresponde a agua.

Por su parte, el fique es una fibra reforzada a micro-escala, constituida por microfibrillas rodeadas por hemicelulosa, lignina, ceras y grasas. La fibra de fique usada en la investigación corresponde a la denominación *Fique Cenizo,* que en estado de recepción tiene aproximadamente 7,71±0,44% de humedad y es capaz de absorber hasta 113,87±15,62% de agua, también tiene una resistencia a la tracción de 23,10±7,54cN/tex (424,27±138,40 MPa) y módulo de elasticidad de 655,06±180,84cN/tex (24,06±6,64 MPa). Superficialmente es rugosa con tres variaciones geométricas transversales: estructural con forma de herradura, arqueada con forma de arco y del xilema con forma arqueada retorcida.

La caracterización química, física y mecánica llevada a cabo a la fibra de fique, permitió establecer que es una fibra de alto desempeño para su uso como elemento de refuerzo de materiales base cemento. Se resalta que la rugosidad y las distintas formas geométricas transversales de la fibra contribuyen al proceso de anclaje de la fibra con la matriz de concreto.

El tratamiento alcalino con NaOH efectuado sobre la fibra de fique produjo modificaciones químicas y morfológicas que generaron la remoción parcial de hemicelulosa, lignina, ceras y grasas de la superficie de la fibra, a la vez que incrementaron la resistencia a la tracción y la rugosidad de la misma, pero disminuyeron el módulo de elasticidad y de la absorción de agua. Asimismo, las condiciones de mercerización usadas en la fibra de fique (fibra sumergida en NaOH al 3% por 10 minutos, baño de parada con 5% de CH_3COOH, lavado final con

abundante agua destilada y secado por 72 horas al aire) evitaron la deslignificación de la fibra natural y la posible conversión en una fibra débil.

La adición de fibra de fique al concreto disminuyó el agrietamiento y el comportamiento frágil característico del material; sirvió de unión entre las partes, evitó la falla repentina y aportó resistencia residual a los esfuerzos aplicados posterior al agrietamiento y por tanto ductilidad, a la vez que incrementó el módulo de rotura y tenacidad del concreto fibro-reforzado.

En las mezclas de concreto fibro-reforzado con fique no se presentó variación en la porosidad del material, por lo tanto, la modificación en sus propiedades se dio por la adición de fibra de fique a la mezcla. De igual forma se evidenció que las distintas longitudes de fibra usadas (10 mm, 20 mm y 30 mm) no tuvieron influencia significativa sobre las propiedades mecánicas del material cementicio reforzado con fibra de fique.

Las mezclas de concreto con jugo de fique (1,0%, 2,0% y 3,0%) mostraron un comportamiento frágil, similar al concreto patrón; sin embargo, la dosificación de concreto con 1,0% de aditivo natural causó un incremento en el módulo de rotura a flexión hasta del 30%, además mantuvo hasta el 90% de la resistencia a la compresión y 82% de la resistencia a la tracción indirecta. Asimismo, el uso de jugo de fique como aditivo promovió la mayor formación de porosidad aislada en el concreto, efecto provocado por el contenido de saponinas del aditivo natural que producen la formación de burbujas en la mezcla de jugo y concreto.

Las burbujas de aire incorporadas por el uso del jugo de fique produjeron que en la matriz cementicia aumentara el contenido total de poros y que disminuyera su permeabilidad, lo cual indica que no necesariamente los poros deban estar interconectados entre sí (poros permeables), esto muestra que se produjo porosidad cerrada o aislada, la cual dificultó la difusión de CO_2 hacia el interior del

concreto. La dosificación de concreto con jugo de fique al 1,0% fue la más adecuada puesto que permitió en menor grado la penetración de CO_2. Por otra parte, el ensayo rápido de carbonatación reflejó un incremento en la resistencia a la compresión a mayores tiempos de exposición.

En los materiales cementicios reforzados con fibras naturales como la fibra de fique, la carbonatación acelerada es una alternativa para aumentar la durabilidad de estos compuestos fibro-reforzados porque el proceso permite incrementar su resistencia mecánica, lo que podría ser un índice de una mayor durabilidad debido a la disminución en la alcalinidad de la matriz cementicia, asociado a una menor porosidad, diámetro de poro y densificación de la matriz por la precipitación de $CaCO_3$.

En el campo de los materiales de construcción, las posibles aplicaciones del concreto reforzado con fibra y jugo de fique sería en elementos sometidos a flexión y en el control de la fisuración, tales como: pisos y pavimentos, tanques de agua, tuberías, tejas, elementos resistentes al fuego (menor spalling) y concreto lanzado. Asimismo, la presente disertación doctoral contribuiría a mitigar efectos medio ambientales y a mejorar las condiciones de vida de los productores cuya principal actividad económica es el beneficio del fique en Santander (Colombia).

Se puede considerar que los resultados obtenidos en la investigación son satisfactorios, teniendo en cuenta la esencia disímil de los elementos en estudio, como es el origen natural de la fibra y el jugo de fique y el origen cerámico de la matriz cementicia que forman al material compuesto. Esta investigación es la primera que combina la fibra y el jugo de fique como adiciones al concreto, por lo tanto, se recomienda continuar profundizando en el estudio de este material antes de su posible implementación.

5. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la investigación, se proponen los siguientes temas de investigación, de tal forma que permitan responder a nuevos interrogantes e igualmente profundizar en el tema de investigación.

Se recomienda llevar a cabo otros estudios, en los que se profundice acerca de la morfología, absorción de agua, características químicas y mecánicas de la fibra de fique, y la relación con sus distintas propiedades. De igual forma ahondar en el estudio acerca del jugo de fique orientado hacia estabilizar la fermentación sin perder su poder espumante.

También se recomienda llevar a cabo estudios acerca del efecto de la humedad en la fibra, como también investigar sobre cambios morfológicos en ella por permanecer periodos de tiempo largos en el concreto, incluso sometiendo el material a un ambiente externo. Además, se requieren investigaciones que involucren otras longitudes de fibra, porcentaje y concentración del jugo de fique en el concreto. Por otra parte, se propone realizar estudios que involucren la resistencia al fuego de concreto adicionado con fibra y jugo de fique. Asimismo, indagar acerca de las distintas aplicaciones no estructurales que impliquen concreto reforzado con fibras y otras investigaciones en las cuales se modifiquen la composición de la matriz con el fin de reducir los compuestos alcalinos.

Por último, se recomienda realizar otros trabajos de investigación que involucren el jugo de fique como aditivo y su efecto sobre la carbonatación de concreto sin y con refuerzo de fibra natural. También llevar a cabo otras investigaciones que permitan establecer con mayor precisión la relación entre la porosidad interconectada y la conductancia eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

ALI, Majid, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. Enero 21 de 2012. Revista Construction and Building Materials, 30, 814-825. (Recuperado el 30 mayo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

ALVES FIDELIS, Maria Ernestina, et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. Junio 15 de 2013. Revista Journal of materials research and technology. 2, (2), 149-157. (Recuperado el 15 marzo 2014). Disponible en: www.jmrt.com.br.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. United States.: ACI, 2002. 38p. ACI 211.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. 8p. ASTM C192.

_____. Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. 4p. ASTM C260.

_____. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2012. 5 p. ASTM C1760.

_____. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken United States.: ASTM, 2014. 7p. ASTM C39.

_____. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. 3p. ASTM C642.

_____. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2014. 4p. ASTM C138.

_____. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken United States.: ASTM, 2009. 4p. ASTM C78.

_____. Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. 8p. ASTM C1018.

_____. Standard Test Method for Foaming Properties of Surface-Active Agents. West Conshohocken United States.: ASTM, 2015. 3p. ASTM D1173.

_____. Standard Test Method for Linear Density of Textile Fibers. West Conshohocken United States.: ASTM, 2012. 10p. ASTM D1577.

_____. Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode. West Conshohocken United States.: ASTM, 1997. 6p. ASTM E70.

_____. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken United States.: ASTM, 2012. 4p. ASTM C143.

_____. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken United States.: ASTM, 2011. 5p. ASTM C496.

_____. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. West Conshohocken United States.: ASTM, 2007. 10p. ASTM D3822.

ARDANUY, Monica; CLARAMUNT, Josep; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Enero 22 de 2015. Revista Construction and Building Materials, 79, 115-128. (Recuperado el 8 agosto 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

AZIZ, M. A.; PARAMASIVAN, P.; LEE, S. L. Prospect for natural fibre reinforced concretes in construction. En: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Mayo, 1981, vol. 3, no. 2, p. 123-132.

BADRINATH, R.; SENTHILVELAN, T. Comparative investigation on mechanical properties of banana and sisal reinforced polymer based composites. 2014. Revista Science Direct. 5, 2263-2272. (Recuperado el 15 julio 2016). Disponible en: www.elservier.com/locate/procedia.

BARRETO, A. C. H., et al. Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites. Junio 21 de 2011. Revista Science Direct, part A (42), 492-500. (Recuperado el 19 junio 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

BAYRAMOV, F.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. Junio 25 de 2003. Revista Cement & Concrete Composites. 26, 665-675. (Recuperado el 27 octubre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

BENAVIDES, Olga L., et al. Cuantificación de sapogeninas del jugo fresco y fermentado de fique (furcraea gigantea) mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-PDA). En: Información Tecnológica. 2012, vol. 23, no. 3, p.67-76.

BERETA, Andres, et al. Medición de pH del suelo con papel reactivo. En: Agrociencia Uruguay. Julio-Diciembre, 2015, vol. 19, no. 2, p. 68-74.

BLANCO, A., et al. Influence of the Type of Fiber on the Structural Response and Design of FRC Slabs. En: J. Struc. Eng. 2016, vol. 142, no. 9, p. 1-11.

CAO, Y.; SHIBATA, S. y FUKUMOTO, I. Mechanical Properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. Part A, 2006. Revista Science Direct, 37, 423-429. (Recuperado el 19 junio 2016). Disponible en www.elsevier.com/locate/compositesa.

CARRILLO, Julián; APERADOR, William; GONZÁLEZ, Giovanni. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería Investigación y Tecnología. Julio-septiembre, 2013, vol. XIV, no. 3. p. 435-450.

CARVALHO, Kelly C., et al. Chemical modification effect on the mechanical properties of hips coconut fiber composites. 2010, Revista Bioresources. 5(2), 1143-1155. (Recuperado el 5 febrero 2015). Disponible en: www.bioresources.com.

CASTRO, Cristina, et al.: Determinación de condiciones óptimas para el tratamiento alcalino de fibras de fique empleadas como reforzante de materiales compuestos. En: Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia. 2007, vol.30, no.2., p. 136-142.

CONTRERAS, María F.; HORMANZA, Wilson A.; MARAÑON, A. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. Julio 20 de 2009. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1(1), 57-67. (Recuperado el 25 marzo 2015). Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html.

COOK, D. J.; PAMA, R. P.; WEERASINGLE, H. L. S. D. Coir fibre reinforced cement as a low cost roofing material. En: Building and Environment. 1978, vol. 13, p. 193-198.

DE ALMEIDA MELO FILHO, Joao; DE ANDRADE SILVA, Flavio; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. Abril 18 de 2013. Revista Cement & Concrete Composites, 40, 30-39. (Recuperado el 10 noviembre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

DE ANDRADE SILVA, Flavio, et al. Effect of fiber shape morphology on interfacial bond and cracking behavior of sisal fiber cement based composites. Mayo 10 de 2011. Revista Cement & Concrete Composites. 33, 814-823. (Recuperado el 11 noviembre 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

DE ANDRADE SILVA, Flavio, et al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. Noviembre 22 de 2009. Revista Construction and Building Materials, 24, 777-785. (Recuperado el 15 diciembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

DE ANDRADE SILVA, Flavio; CHAWLA, Nichilesh y DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Tensile behavior high performance natural (sisal) fibers. 2008. Revista Composites Science and Technology, 68, 3438-3443. Disponible en www.elsevier.com/locate/compscitech.

DE ANDRADE SILVA, Flavio; MOBASHER, Barzin; DIAS TOLEDO FILHO, Romildo. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. Julio 30 de 2009. Revista Cement & Concrete Composites, 31, 721-730. (Recuperado el 30 mayo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

DELVASTO, S.; TORO, E. F.; PERDOMO, F.; MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby. An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. Septiembre 12 de 2009. Revista Science Direct. 24, 187-192. (Recuperado el 10 octubre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

DI BELLA, G. Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters. Febrero 8 de 2014. Revista Construction and Building Materials. 58, 159-165. (Recuperado el 25 junio 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

DIAS TOLÊDO FILHO, Romilho, et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. Diciembre 19 de 2008. Revista Construction and Building Materials. 23, 2409-2420. (Recuperado el 15 diciembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

DIAS TOLÊDO FILHO, Romildo, et al. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. En: Revista Brasilera de Engenharia Agrícola e Ambiental. 1999, vol. 3, no. 2., p. 245-256.

DITTENBER, David b.; GANGARAO, Hota V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. Diciembre 3 de 2011. Revista Science Direct. Part A 43, 1419–1429. (Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CULTIVADORES, ARTESANOS Y PROCESADORES DE FIQUE. Manual de asistencia técnica del cultivo de fique. Colombia.: Ministerio de Agricultura, 2017. 80p.

FIGUEROA ANDRADE, Manuel. Comparativa de la tenacidad entre hormigón convencional, hormigón reforzado con fibras de acero y hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Tesis de Magister en Ingeniería de las Cimentaciones, Estructuras y Materiales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2012-2013, 67 p.

FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. Agosto 17 de 2014. Revista Composites: Part B, 68, 14-21. (Recuperado el 17 septiembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.

FOUAD WAFA, Faisal. Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete. En: Eng. Sci., 1990, vol. 2, p. 49-63.

FRAZAO, Cristina, et al. Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete. Noviembre 10 de 2017. Revista Cement and Concrete Composites, 86, 206-223. (Recuperado el 17 junio 2018). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

GALAN GARCIA, Isabel. Carbonatación del hormigón: combinación de CO2 con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, 2011, 202 p.

GARCIA VILLAMIZAR, Claudia Patricia. Obtención por hidrólisis ácida y caracterización de nano fibras de celulosa a partir del bagazo y la estopa de fique.

Tesis de grado en Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2015, 95 p.

GARSIDE, Paul; WYETH, Paul. Identification of Cellulosic Fibres by FTIR Spectroscopy: Thread and Single Fibre Analysis by Attenuated Total Reflectance. 2003. Revista Studies in Conservation, 48(4), p. 269-275. (Recuperado el 17 octubre 2015). Disponible en: http://www.jstor.org/stable/1506916.

GOMEZ CANO, Juan Camilo. Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de concretos y morteros. Tesis de Ingeniería en Civil. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2008, 108 p.

GU, Huang. Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. 2009. Revista Materials and Design, 30, 3931-3934. (Recuperado el 11 noviembre 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matdes.

HERNANDEZ VICENTE, Rene. Uso de fibras de bagazo de caña en concreto. Tratamiento de las fibras con parafina. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Veracruz: Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Civil, 2008, 114 p.

HERRERA FRANCO, P. J.; VALADEZ GONZALEZ, A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. Junio 22 de 2005. Revista Science Direct, part B, 36, p. 597-608. (Recuperado el 14 mayo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.

HERRERA ORTIZ, Julián Orlando; QUINTERO ORTIZ, Luz Amparo y CRUZ HERNANDEZ, Ricardo. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas por medio de medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de un concreto convencional como aporte al estudio de la durabilidad. Tesis Maestría en Ingeniería de Materiales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010, 135 p.

HIDALGO, M.A., MUÑOZ, M.F. Interacción interfacial del compuesto LDPE/Al reforzado con fibra de fique: Influencia de la temperatura. En: X Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Noviembre 2-5, 2010, 8 p.

HIGUERA COGUA, Diana Yarith. Evaluación preliminar del comportamiento a tensión de hilos y mallas de fique recubiertos con nano partículas de hierro. Tesis de grado en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2011, 71 p.

HINDI, Sherif S. Z. Suitability of Date Palm Leaflets for Sulphated Cellulose Nanocrystals Synthesis. 2017. Revista Nanoscience and Nanotechnology Research. Vol. 4, no. 1, 7-16. (Recuperado el 10 enero 2018). Disponible en: http://pubs.sciepub.com/nnr/4/1/2.

ISAZA RUIZ, Marllory, et al. Caracterización mecánica y morfológica de fibras de fique con potencial uso acústico. En: VIII Congreso Internacional de Materiales. 2015, 7 p.

JARAMILLO ZAPATA, Leyla Yamile. Evaluación del jugo de fique como aditivo oclusor de aire y su influencia en la durabilidad y resistencia del concreto. Tesis Maestría en Ingeniería. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2009, 153 p.

JIMENEZ MUÑOZ, Edit, et al. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencialidad en la obtención de pulpa de celulosa para elaboración de papel. En: revista DYNA. Junio, 2016, vol. 83, no. 187, p. 232-242.

JUAREZ ALVARADO, Cesar A.; RODRIGUEZ LOPEZ, Patricia. Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto. En: Revista Ingenierías, enero-marzo, 2004, vol VII, no 22, p. 7-19.

JUAREZ, Cesar; VALDEZ, Pedro; DURAN, ALEJANDRO. Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción. En: Revista Ingeniería de Construcción, agosto, 2014, vol. 19, no. 2, p. 83-92.

LAFHAJ Z., GOUEYGOU M., DJERBi A, KACZMAREK M. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. En: Cement and Concrete Research, 2006, vol. 36, p. 625–633.

LEWIS, Gladius; MIRIHAGALIA, Premalal. Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets. En: Magazine of Concrete Research. Junio, 1979, Vol. 31, No. 107, p. 104-108.

LI, Yan; WING MAI, Yiu; YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. En: Composites Science and Technology. 2000, vol. 60, p. 2037-2055.

LOPATTANANON, Natinee. Performance of Pineapple Leaf Fiber–Natural Rubber Composites: The Effect of Fiber Surface Treatments. Marzo 21 de 2006. Revista Performance of palf-nr composites. Vol. 102, 1974-1984. Disponible en: www.interscience.wiley.com.

LOPEZ HIGUERA, Edinson David. Síntesis in-situ y caracterización de nano partículas de óxido de zinc (ZnO) sobre fibras de fique y su aplicación en la degradación de contaminantes en aguas. Tesis de grado en química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, 2013, 77 p.

LOZANO RIVAS, William Antonio. Uso del extracto de fique (furcraea sp.) como coadyuvante de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales y como disruptor del proceso de nitrificación para la recuperación de cuerpos de agua hipereutrofizados. Tesis Doctoral en Biotecnología. La Rábida: Universidad Internacional de Andalucía, 2011, p 26-27.

MARAR, Khaled, et al. Relación entre la tenacidad a flexión y la energía de impacto en hormigones de alta resistencia reforzados con fibras (HSFRC). En: Materiales de Construcción. Abril-Junio, 2001, vol. 51, no. 252, p. 5-13.

MARTINEZ BARRERA, Gonzalo; MARTINEZ LOPEZ, Miguel; MARTINEZ CRUZ, Elisa. Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa. En: Información Tecnológica, abril, 2013, vol. 24, no. 4, p. 67-74.

MEGIATTO Jr., Jackson D.; RAMINRES, Elaine C.; FROLLINI, Elisabete. Phenolic matrices and sisal fibers modified with hydroxy terminated polybutadiene rubber: Impact strength, water absorption, and morphological aspects of thermosets and composites. Octubre 3 de 2009. Revista Industrial Crops and Products, 31, p. 178-184. (Recuperado el 10 abril 2014). Disponible en: www.elsevier.com/locate/indcrop.

MENDOZA FLOREZ, Liliana Cristina. Evaluación del efecto de las saponinas furcraea ssp sobre el metabolismo microbiano de la mezcla lodo estiércol de cerdo y líquido ruminal para la producción de biogás a partir de bagazo de fique. Trabajo de grado para ingeniero químico. Bucaramanga. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2012, 44 p.

MINISTERIO DEL AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guía ambiental del subsector fiquero. Segunda edición, Bogotá D.C: Panamericana Formas e Impresos, 2006, 122 p.

MISNON, Mohd Iqbal. Potentiality of utilising natural textile materials engineering composites applications. Marzo 15 de 2014. Revista Materials and Design. 59, 359-368. (Recuperado el 25 junio 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matdes.

MOJICA PIMIENTO, Amilcar; PAREDES VEGA, Joaquín. El cultivo de fique en el Departamento de Santander. Bucaramanga: Centro Regional de Estudios Económicos Bucaramanga, 2004, 24 p.

MONSALVE, Jonathan; SANCHEZ, Martha L.; BAQUERO, David. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de paneles reforzados con fibras de caña brava. Junio de 2016. Revista INGE CUC, vol. 4, no. 1, 66-74. (Recuperado el 23 marzo 2017). Disponible en: http://dx.doi.org/10.17981/ ingecuc14.1.2018.06.

MORAN, Juan I., et al. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. Agosto 15 de 2015. Revista INTEMA, 15, p. 149-159. (Recuperado el 15 agosto 2015). Disponible en: https://www.researchgate.net/journal/0969-0239_Cellulose.

MORENO, Eric I., et al. Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. En: Ingeniería, 2004, vol. 8, no. 2, p. 117-130.

MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K.G. Structure properties of some vegetables fibers. En: Journal of Materials Science. 1984, no.19., p. 3925-3934.

MWAIKAMBO, Leonard Y.; ANSELL, Martin P. Chemical modification of hemp, sisal, yute and kapok fibers by alkalization. En: Journal of Applied Polymer Science. 2002, vol. 84, p. 2222-2234.

NELSON, Mary L.; O´CONNOR, Robert T. Relation of Certain Infrared Bands to Cellulose Crystallinity and Crystal Lattice Type. Part II. A New Infrared Ratio for Estimation of Crystallinity in Celluloses I and II. En: Journal of Applied Polymer Science. 1964, vol. 8, p. 1325-1341.

NORMA TECNICA ECUATORIANA. Textiles. Sistema universal de numeración para los hilados (Sistema Tex). Ecuador.: NTE INEN, 1990. 10p. NTE INEN 207.

OBI REDDY, K., et al. Effect alkali treatment on the properties of century fiber. Septiembre 10 de 2013. Revista Journals of Natural Fibers, 10:3, p. 282-296. (Recuperado el 21 diciembre 2014). Disponible en: http://www.tandfonline.com/loi/wjnf20

OCHOA, Juan Carlos; JARAMILLO, Leyla. Uso del jugo de fique como aditivo orgánico en el hormigón. En: Scientia et Technica Año XIII. Septiembre, 2007, no. 36, p. 455-459.

OKSMAN, Kristiina, et al. Morphology and mechanical properties of unidirecional sisal epoxy composites. En: Journal of Applied Polymer Science. 2002, vol. 84., p. 2358-2365.

OSORIO SARAZ, Jairo Alexander; VARON ARISTIZABAL, Fredy; HERRERA MEJIA, Jhonny Alexander. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. En: Revista DYNA. Noviembre, 2007, vol. 74, no. 153, p. 69-79.

OTERO R., Iván Darío, et al. Bacterias aisladas del jugo de fique con actividad antagónica sobre Phytophthora Infestans (Mont.) de Bary. En: Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial. Enero-junio, 2014, vol. 12, no. 1, p. 28-35.

PACHECO TORGAL, Fernando; JALALI, Said. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibre. A review. Agosto 21 de 2010. Revista Science Direct. 25, 575-581. (Recuperado el 2 diciembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

PARK, Sunkyu, et al. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulose performance. En: Biotechnology for Biofuels. Marzo, 2010, vol. 3, p. 1-10.

PARRA LOPEZ, Andres Guillermo; PARRA MEJIA, Marco Fidel. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra. Tesis en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Fisicomecánicas. 2007, 75 p.

PEREZ GARCIA, Luis Alberto. Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos a base de fibra de fique y fibras sintéticas. Tesis de grado en Ingeniería Mecánica. Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe. Facultad de Ingeniería, 2014, 85 p.

PESIC, Ninoslav; et al. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. Abril 22 de 2016. Revista Construction and Building Materials, 115, p. 362-370. (Recuperado el 27 octubre 2017). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

PINZON GALVIS, Sandra. Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. En: Revista Ingenierías. Octubre-Diciembre, 2013, vol. XVI, no. 61, p. 27-37.

POOLE, Alan y SIMS, Ian. A handbook of investigative techniques. Boca Ratón: CRC press, 2016. 755 p. ISBN 978 – 1 – 85617 – 690 – 3.

PRASAD KUNDU, Sarada, et al. Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties. Septiembre 27 de 2012. Revista Construction and Bulding Materials, 37 p. 844-846. (Recuperado el 15 septiembre 1016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

QUINTERO GARCIA, Sandra Liliana; GONZALEZ SALCEDO, Luis Octavio. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. En: Ingeniería y Desarrollo. Julio- Diciembre, 2006, no. 20, p. 134-150.

RAMÍREZ ARELLANES, S., et al. Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. En: Materiales de Construcción. Julio-Septiembre, 2012, vol. 62, no. 307, p. 327-341.

RAMLI, Mahyuddin; HOE KWAN, Wai; FAISAL ABAS, Noor. Application of non-corrosive barchip fibres for high strength concrete enhancements in aggressive environments. Abril 17 de 2013. Revista Composites: Part B, 53, 134-144. (Recuperado el 12 julio 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesb.

RAY, Dipa; SARKAR, B. K. Characterization of alkali treated jute fibers for physical and mechanical properties. En: Journal of Applied Polymer Science. 2001, vol. 80., p. 1013-1020.

REHDER, Benjamin; BANH, Kingsten; NEITHALATH, Narayanan. Fracture behavior of pervious concretes: the effects of pore structure and fibers. Febrero 7 de 2014. Revista Engineering Fracture Mechanics. 118, p. 1-16. (Recuperado el 3 abril 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/engfracmech.

RODRIGUEZ VILLAREAL, Fredy Arnulfo. Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzados con fibras metálicas. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, 2013, 55 p.

ROMA Jr., Luis C.; MARTELLO, Luciane S.; SAVASTRANO Jr., Holmer. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. Noviembre 28 de 2006. Revista Construction and Building materials, 22, p. 668-674. (Recuperado el 5 septiembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

RONG, Min Zhi, et al. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. Marzo 13 de 2001. Revista Composites Science and Technology, 61, 1437-1447. (Recuperado el 25 de septiembre de 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compscitech.

SAIKIA, Nabajyoti; DE BRITO, Jorge. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. Diciembre 5 de 2013. Revista Construction and Building Materials, 52, p. 236-244. (Recuperado el 17 septiembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/conbuildmat.

SATYANARAYANA, Kestur G, et al. Characterization blue agave bagasse fibers of México. Octubre 9 de 2009. Revista Science Direct. Part A, 45, 153-161.

(Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. Febrero 11 de 2000. Revista Cement and Concrete Composites, 22, p. 379-384. (Recuperado el 10 febrero 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

SAVASTANO Jr., H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. Julio 3 de 2002. Revista Cement and Concrete Composites, 25, p. 311-319. (Recuperado el 10 febrero 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

SCHELLBACH, Sara L.; MONTEIRO, Sergio N.; DRELICH, Jaroslaw W. A novel method for contact angle measurements on natural fiber. Noviembre 10 de 2015. Revista Science Direct. 164, 599-604. (Recuperado el 10 diciembre 2016). Disponible en: www.elsevier.com/locate/matlet.

SECRETARIA DE AGRICULTURA DE SANTANDER. Hablemos de fique en Santander y Colombia. Curití.: Cohilados del Fonce S.A., 2005. 42 p.

SGRICCIA, N.; HAWLEY, M. C.; MISRA, M. Characterization of natural fibers surfaces and natural fibers composites. Julio 14 de 2008. Revista Science Direct, part A, 39, p. 1632-1637. (Recuperado el 27 abril 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/compositesa.

SIROKY, Jan, et al. Attenuated total reflectance Fourier-transform Infrared spectroscopy analysis of crystallinity changes in lyocell following continuous treatment with sodium hydroxide. Noviembre 18 de 2009. Revista Cellulose, 17, 103-

115. (Recuperado el 4 marzo 2015). Disponible en: https://www.researchgate.net/journal/1572-882X_Cellulose.

STUTZMAN, Paul E., et. al. Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography. En: Materials Science of Concrete. 2001, vol. 59, no. 72, p. 59-72.

SULLCAHUAMÁN, J.A., et al. Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas. En: Memorias VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Octubre 23-25, 2007, 9 p.

SYMINGTON, Mark C.; BANKS, W. M.; OPUKURO, David West. Tensile Testing of Cellulose Based Natural for Structural Composite Aplications. En: Journal of Composite Materials. 2009, vol. 43, no. 9, p. 1083-1108.

TAGNIT HAMOU, Arezki; SARIC-CORIC, Mladenka; RIVARD, Patrice. Internal deterioration of concrete by the oxidation of pyrrhotitic aggregates Junio 17 de 2004. Revista Cement and Concrete Research, 35, p. 99-107. (Recuperado el 7 mayo 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.

TARA SEN, H. N.; JAGANNATHA, Ready. Application of Sisal, Bamboo, Coir and Jute Natural Composites in Structural Upgradation. En: International Journal of Innovation, Management and Technology. Junio 2011, Vol 2, No 3, p 186-191.

TONOLI, G. H.D., et al. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. Octubre 26 de 2010. Revista Cement & Concrete Composites, 33, p. 225-232. (Recuperado el 25 marzo 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/cemconcomp.

TROEDEC, M., et al. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres. En: Composites Part A. 2008, vol. 39, no. 3, p. 514-522.

VANGUELUWE, L. Influence of strain rate and yarn number on tensile test results. En: Textile Research Journal. Octubre, 1992, p. 586-589.

VILAY, V.; MARIATTI, M.; MAT TAIB, R.; TODO, Mitsugo. Effect of fiber surface treatment a fiber loading on the properties of bagasse fiber-reinforced unsaturated polyester composites. 2008. Revista Composites Science and Technology, 68, 631-638. (Recuperado el 11 noviembre 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.

WEI, Jianqiang; MAYER, Christian. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. Noviembre 17 de 2013. Revista Science Direct. 289, 511-523. (Recuperado el 20 agosto 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/apsusc.

WEI, Jianqiang; MEYER, Christian. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. Marzo 11 de 2015. Revista Cement and Concrete Research, 73, p. 1-16. (Recuperado el 10 noviembre 2017). Disponible en: http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp.

XUE, Li; LOPE G., Tabil; SATYANARAYAN, Panigrahi. Chemical Treatments of Natural Fiber for used in Natural Fiber Reinforced Composites: A review. En: J Polym Environ. Enero, 2007, p. 25-33.

YAN, Haiping, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Junio 10 de 2007. Revista Science Direct, 86, p. 1781-1788. (Recuperado el 29 abril 2015). Disponible en: www.sciencedirect.com.

YAN, Libo; KASAL, Bohumil y HUANG, Liang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. Part B, Febrero 27 de 2016. Revista Science Direct, 92, 94-132. (Recuperado el 11 mayo 2017). Disponible en www.elsevier.com/locate/compositesb.

ZHOU, Feng; CHENG, Guangxu; JIANG, Bo. Effect of silane treatment on microstructure of sisal fibers. Diciembre 16 de 2013. Revista Applied Surface Science, 292(2014), 806-812. (Recuperado el 29 de abril 2015). Disponible en: www.elsevier.com/locate/apsusc.

ANEXOS

ANEXO A. Dosificaciones de concreto

La Tabla A presenta el diseño de mezcla para 1 m^3 de concreto con las adiciones de fibra y jugo de fique.

Tabla A. Dosificaciones de concreto

Concreto simple		Concreto fibro-reforzado			Concreto con jugo de fique		
		0,5%	0,75%	1,0%	1,0%	2,0%	3,0%
Constituyente				Masa (kg)			
Agua	203,5	203,5	203,5	203,5	199,7	195,9	192,2
Cemento	407,0	407,0	407,0	407,0	407,0	407,0	407,0
Agre. grueso	948,0	948,0	948,0	948,0	948,0	948,0	948,0
Agre. fino	774,1	770,2	768,3	766,4	774,1	774,1	774,1
Fibra de fique	---------	3,9	5,8	7,7	---------	---------	---------
Jugo de fique	---------	---------	---------	---------	3,8	7,6	11,3

ANEXO B. Matrices experimentales

La Tabla B presenta las matrices experimentales de la investigación. Allí se encuentran la cantidad de muestras y/o probetas ensayadas en cada prueba realizada a la fibra y al jugo de fique, también a cada tipo de concreto.

Tabla B1. Matriz experimental para fibra y jugo de fique

Adición	Ensayo	Cantidad de muestras
Jugo	pH	3 cada día de ensayo (9 días)
	Formación espuma	3 cada día de ensayo (9 días)
	Extracto seco convencional	3
	Composición jugo fique	2
Fibra	Contenido de humedad	6
	Absorción de H_2O	6
	Densidad lineal	44
	Composición fibra fique	1
	FTIR	1
	MOP	270
	MEB	15
	Tracción Fibra de fique sin TT	40
	Diámetro MOP	60
	Diámetro MEB	10
	Área MOP	60
	Área MEB	10
Fibra TT	Absorción de H_2O (5 y 10 min)	12
	Tracción Fibra TT (5 y 10 min)	40
	FTIR (fibra tratada 5 y 10 min)	2
	MOP (fibra tratada 5 y 10 min)	90
	MEB (fibra tratada 5 y 10 min)	30

Tabla B2. Matriz experimental para concreto

Estado del concreto	Ensayo	Cantidad de muestras de concreto simple	Cantidad de muestras de concreto+fibra	Cantidad de muestras de concreto+jugo	Cantidad de muestras de concreto+fibra+jugo	Total
Estado fresco	Asentamiento	2	20	8	12	42
	pH	3	30	12	18	63
	Densidad	3	30	12	18	63
Estado endurecido	Resistencia a la compresión	9	90	36	54	189
	Tracción indirecta	9	90	36	54	189
	Flexión	9	90	36	54	189
	Porosidad y densidad	12	120	48	72	252
	MEB	4	55	32	10	101
	DRX	2		10		12
	Porosidad ZnO-Image J	3	12	10	8	33
Carbonatación	Conductancia eléctrica	4	40	16	24	84
	Carbonatación acelerada	38		54	18	110
	Resistencia a la compresión	9		27	9	45
	Penetración (fenolftaleina)	29		27	9	65
	DRX	1		3		4

ANEXO C. Cambio porcentual de las propiedades mecánicas

La Tabla C presenta el resumen del comportamiento mecánico, en porcentaje (%), de cada una de las dosificaciones elaboradas respecto a la mezcla de concreto simple.

Tabla C. Cambio porcentual de las propiedades mecánicas

Mezcla de concreto	Compresión (%)	Tracción Indirecta (%)	Módulo de rotura a Flexión (%)
CS	100,00	100,00	100,00
0,5%-10 mm	86,13	80,60	108,52
0,5%-20 mm	83,22	90,40	111,93
0,5%-30mm	72,62	77,93	109,65
0,75%-10 mm	70,89	77,33	124,37
0,75%-20 mm	61,74	83,97	124,69
0,75%-30mm	81,22	97,13	131,75
1,0%-10 mm	66,30	85,80	100,78
1,0%-20 mm	68,75	85,83	119,49
1,0%-30 mm	61,26	77,24	110,27
CJ 1%	90,27	82,08	130,70
CJ 2%	69,75	78,97	125,77
CJ 3%	31,39	39,70	74,48
CA 0,5%	89,83	89,70	118,10
CF5J1	67,42	81,66	111,47
CF5J2	54,44	72,64	105,34
CF75J1	67,10	76,42	106,80
CF75J2	47,05	65,93	91,48
CFA	92,07	101,54	123,06
CFT	65,32	77,55	134,41
CJFT	64,92	77,93	113,03